

Министерство образования и науки Российской Федерации
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра конструирования узлов и деталей РЭА (КУДР)

Н.И. Кузбных

**ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ
ПРИБОРОВ С ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗЬЮ**

*Руководство к лабораторной работе для студентов специальности
211000 Конструирование и технология электронных средств*

2014

СОДЕРЖАНИЕ

1 Введение.....	3
2 Устройство и принцип функционирования ПЗС-устройств.....	4
2.1 Устройство и принцип функционирования МДП-конденсатора.....	4
2.2 Структура и принцип действия сдвигового регистра на ПЗС.....	5
2.3 Устройство ввода информационного заряда.....	7
2.4 Устройство вывода информации.....	9
2.5 Устройство ПЗС – регистра.....	11
3 Физические основы работы ПЗС. Основные параметры.....	12
4 Описание лабораторной установки.....	16
5 Задание на выполнение лабораторной работы.....	17
6 Контрольные вопросы для самопроверки.....	17
Рекомендуемая литература.....	18

1 ВВЕДЕНИЕ

Приборы с зарядовой связью – это полупроводниковые приборы, имеющие большое число близко расположенных и изолированных от подложки затворов (МДП-структур), под которыми может происходить перенос к стоку информационных пакетов неосновных носителей заряда, инжектированных из истока, либо возникших в подложке из-за поглощения оптического излучения [1].

Приборы с зарядовой связью (ПЗС) были изобретены в 1969 г. американскими учеными В. Бойлом и Дж. Смитом и оказались весьма перспективными. В 70-х и в 80-х годах наблюдается интенсивная разработка и внедрение устройств на основе ПЗС в микроэлектронику. Это было продиктовано, прежде всего, необходимостью повышения степени интеграции функциональных устройств для обработки все возрастающих потоков информации.

Существующие в то время интегральные микросхемы базировались на использовании *p-n*-переходов и были достаточно сложны по конструкции и технологии изготовления и не удовлетворяли требованиям интеграции и надежности. ПЗС же, в отличие от других полупроводниковых приборов, имеют малое число потенциально ненадежных элементов структуры – диффузионных областей и контактов металла с полупроводником. Это позволяет существенно повысить процент выхода годных приборов при изготовлении, снизить себестоимость и повысить надежность ПЗС. Одним из основных достоинств ПЗС является *высокая степень интеграции*, позволяющая строить на их основе большие и сверхбольшие ИС, содержащие до полумиллиона элементов на одном кристалле. При этом устройства на ПЗС имеют существенно меньшие массогабаритные показатели, а потребление энергии ПЗС-устройств на порядок ниже аналогичных устройств, реализованных на *p-n*-переходах.

На основе микросхем с зарядовой связью разработаны малогабаритные радиолокационные системы и системы связи нового поколения, созданы уникальные телевизионные астрономические устройства для наблюдения космических объектов весьма слабой интенсивности, разработаны детекторные устройства для регистрации пространственных, временных и энергетических характеристик излучений, решена задача разработки полностью полупроводниковых телевизионных камер и видеозаписывающей аппаратуры. Устройства ПЗС успешно используются, в вычислительных средствах. Совершенствование конструктивных решений и технологических процессов определяют в настоящее время основные направления в разработке новых функциональных устройств на основе ПЗС.

Для успешной разработки электронных устройств с использованием функциональных устройств на ПЗС необходимо знать принципы функционирования, конструктивные особенности и физические свойства их.

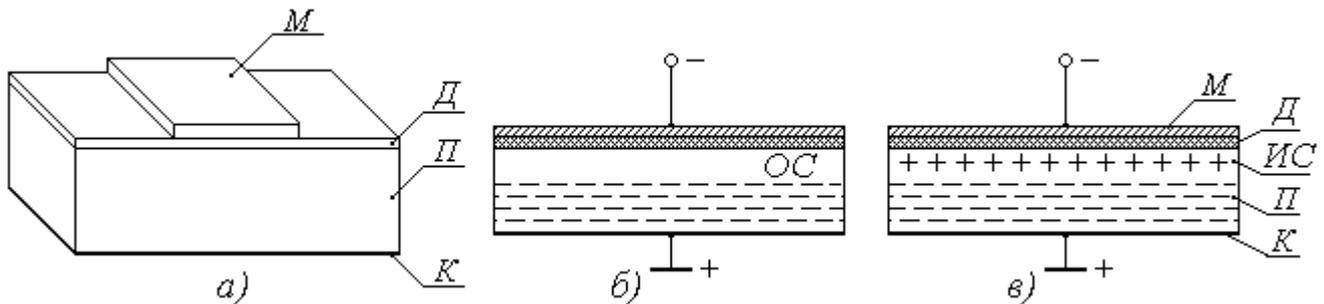
В цели данной лабораторной работы ставится изучение:

- физических основ функционирования приборов с зарядовой связью;
- принципов реализации и конструктивных особенностей ПЗС-устройств;
- основных свойств ПЗС и областей применения их в электронных средствах.

2 УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПЗС-УСТРОЙСТВ

2.1 Устройство и принцип функционирования МДП-конденсатора

Конструктивно ПЗС представляет собой ряд простых структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП-структур), сформированных на общей полупроводниковой подложке. Технология изготовления ПЗС весьма проста: на полупроводниковой подложке (например, Si n -типа проводимости) формируется тонкий слой (0,1 - 0,15 мкм) диэлектрика, на который наносится ряд проводящих электродов (преимущественно из металла) в виде линейной или матричной регулярной системы. С противоположной стороны подложки наносится методом металлизации омический контакт. В качестве диэлектрика преимущественное применение получил окисел кремния SiO_2 . Эта структура ПЗС получила название МОП-структуры (металл-окисел-полупроводник), на базе которой освоено промышленное производство широкого класса интегральных микросхем ПЗС. Таким образом, основным структурным элементом ПЗС является МДП-структура или МДП-конденсатор, конструкция которого приведена на рисунке 2.1, а.



*М – металл (электрод); Д – диэлектрик (окисел); П – полупроводник;
К – омический контакт (катод); ОС – обедненный слой; ИС – инверсный слой*

Рисунок 2.1 – МДП-конденсатор

Если напряжение на электродах отсутствует, то области полупроводника равномерно заселены основными носителями заряда – в полупроводнике Si n -типа – электронами.

При подаче на металлический электрод положительного напряжения в МДП-структуре индуцируется две области зарядов. Одна область заряда, обусловленная поляризацией диэлектрика, располагается на поверхности полевого электрода M . Вторая область образуется в приповерхностном слое полупроводника, так как в образовавшемся электрическом поле электроны притягиваются к изоляционному слою, образуя *область приповерхностного заряда* (ОПЗ). Очевидно, что общая емкость такого конденсатора будет определяться как емкость двух последовательно соединенных конденсаторов – емкости диэлектрика и полупроводника (ОПЗ). Емкость же, обусловленная ОПЗ, является динамической и находится в сильной зависимости от напряженности электрического поля и его направления. Следовательно, емкость МДП-конденсатора зависит от величины и полярности приложенного напряжения.

Если к металлическому электроду M подвести отрицательное напряжение, то под действием электрического поля электроны, находящейся под электродом, будут вытеснены из этой области. В полупроводнике образуется **динамическая неоднородность в виде области, обедненной основными носителями – обедненная область (ОС)** (рисунок 2.1, б). Эту область можно рассматривать как потенциальную яму, глубина которой зависит от величины приложенного отрицательного напряжения. Но со временем в обедненной области происходит генерирование положительных и отрицательных частиц (дырок и электронов). При этом электроны вытесняются из обедненной области, а дырки наоборот концентрируются у поверхности диэлектрика, образуя **инверсный слой (ИС)** – приповерхностный слой, обогащенный дырками (рисунок 2.1, в). В данном случае ИС представляет **паразитный заряд**.

Рабочим режимом ПЗС является режим образования обедненной области, в которую вместо **паразитного заряда** может быть помещен пакет дырок, несущих полезную информацию – **информационный заряд**. Поэтому для ПЗС важно время, в течение которого динамическая неоднородность в виде обедненной области сохраняет свои свойства (не заполняется паразитными зарядами).

2.2 Структура и принцип действия сдвигового регистра на ПЗС

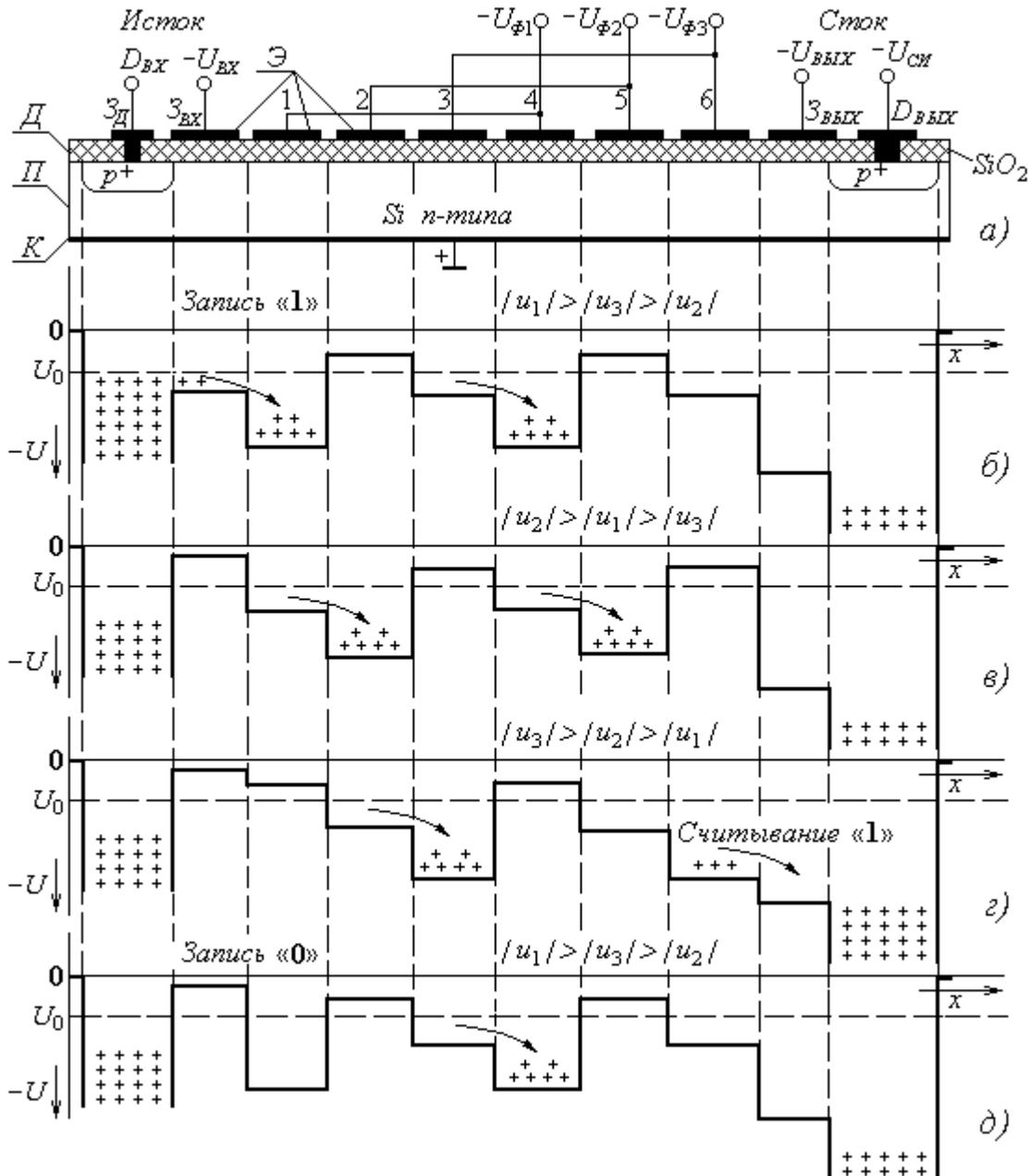
Принцип работы ПЗС основан на возникновении, хранении и направленной передаче зарядовых пакетов в потенциальных ямах, образующихся у поверхности (или вблизи поверхности) полупроводника при приложении к электродам внешних электрических напряжений.

Как уже было отмечено выше, ПЗС представляют собой совокупность простых МДП-структур, сформированных на общей полупроводниковой подложке таким образом, что полосы проводящих электродов образуют линейную или матричную, регулярную систему. При этом расстояния между соседними электродами столь малы (несколько мкм), что существенными являются эффекты взаимного влияния соседних электродов.

Большинство функциональных устройств на ПЗС создаются на основе сдвиговых регистров. Устройство и принцип функционирования устройств на ПЗС рассмотрим на примере трехтактного ПЗС-регистра, приведенного на рисунке 2.2. На рисунке 2.2,а представлена структура ПЗС-регистра, реализованного на кремниевой подложке n -типа ($П$). На поверхности подложки сформирован тонкий слой диэлектрика (D) (окисла SiO_2), на который нанесены проводящие электроды ($Э$) в виде регулярной линейной структуры. Электроды подключены к соответствующим управляющим устройствам. Снизу подложки – сплошная металлизация (K) – омический контакт.

В устройстве сдвигового регистра можно выделить три секции: входную, переноса и выходную.

Входная секция (Исток) включает в себя p - n -переход ($D_{ВХ}$) и входной затвор ($Э_{ВХ}$), выполняющий роль ключа для управления движением дырок из диффузионной p^+ -области истока в первую потенциальную яму.



а – структура ПЗС-регистра; б – запись логической единицы в первую ячейку секции переноса; в – перенос информационного заряда из первой ячейки во вторую; г – перенос информационного заряда из второй ячейки в третью и считывание логической единицы на выходе регистра; д – запись логического нуля в первую ячейку секции переноса

Рисунок 2.2 – Структура и принцип действия трехтактного ПЗС-регистра

Секция переноса состоит из ряда затворов (1-6), управляющих потенциалом на границе кремний-двуокись кремния. Эти затворы в трехтактной схеме соединены между собой через два. Напряжения на затворах секции переноса ($U_{\phi 1}-U_{\phi 3}$) имеют вид ступенчатых импульсов с различной амплитудой, которые сменяют друг друга циклической перестановкой (рисунки 2.2, б-д). При таком изменении напряжения на затворах потенциальные ямы перемещаются к выходу регистра, увлекая за собой пакеты носителей информации – дырок.

Выходная секция (Сток) представляет собой обратный смещенный *p-n*-переход (выходной диод $D_{ВЫХ}$) и выходной затвор $Z_{ВЫХ}$, на который подается

постоянное смещение $U_{ВЫХ}$. Выходное устройство предназначено для экстракции (извлечения) дырок из подходящих к нему потенциальных ям (рисунок 2.2, з) и преобразования пакетов дырок в соответствующие потенциалы.

Рассмотрим принцип функционирования ПЗС-регистра. Пусть в исходном состоянии в ячейке **3** секции переноса имеется информационный заряд – логическая единица («1»), а в *истоке* – инжектированы дырки.

На первом такте работы (рисунок 2.2, б) на входной затвор $Z_{ВХ}$ подано напряжение $U_{ВХ}$ больше порогового U_0 ($|U_{ВХ}| > |U_0|$). Под действием этого напряжения под входным затвором образуется проводящий канал. Если при этом на затворе **1** секции переноса существует достаточно большое отрицательное напряжение ($|U_{Ф1}| > |U_{ВХ}|$), т. е. под первым затвором секции переноса существует глубокая потенциальная яма для дырок, то дырки будут выходить из истока, проходить по каналу под входным затвором и накапливаться в потенциальной яме под первым затвором секции переноса. Очевидно, что имеющийся в третьей ячейке информационный заряд по той же причине перейдет в четвертую ячейку.

К началу следующего такта напряжение на входном затворе $U_{ВХ}$ снимается. Поэтому проводящий канал под входным затвором исчезает. Таким образом, произошла запись информации, например, логической единицы («1»), так как под первым затвором секции переноса остался пакет дырок.

После смены напряжений на затворах секции переноса самое большое отрицательное напряжение будет на затворах **2** и **5**, поэтому пакеты дырок передвинутся в потенциальные ямы под вторым и пятым затворами секции переноса (рисунок 2.2, в). При следующих тактах изменения напряжения на затворах секции переноса будет происходить дальнейшее продвижение пакетов дырок к выходной секции (рисунки 2.2, з, д).

Если в потенциальных ямах, подходящих к *p-n*-переходу *стока*, нет носителей заряда – дырок, то не будет и изменения тока в цепи стока. И только в том случае, когда потенциальная яма, содержащая дырки, подойдет к *p-n*-переходу стока, дырки втянутся в него и в цепи стока пройдет импульс тока или изменится напряжение на стоке (рисунок 2.2, з).

На четвертом такте работы регистра (рисунок 2.2, д) на входной затвор напряжение не подано ($|U_{ВХ}| < |U_0|$). Поэтому зарядовый пакет, находящийся в истоке, не перетечет под первый затвор секции переноса, что соответствует записи логического нуля («0»).

Рассмотрим подробнее устройства ввода и вывода аналоговой информации и конструктивные особенности ПЗС-регистра.

2.3 Устройство ввода информационного заряда

Устройства ввода и вывода являются обязательными элементами ПЗС-устройств. Они служат для ввода, считывания и регенерации информации и в значительной степени определяют характеристики устройств на ПЗС.

Ввод информационного заряда в ПЗС может осуществляться двумя способами: инжекцией неосновных носителей заряда и генерацией неосновных носи-

телей в ПЗС-ячейках под воздействием электромагнитного облучения. Второй способ используется только в фоточувствительных ПЗС и в данной работе не рассматривается. Для ввода цифровой и аналоговой информации в ПЗС-устройства наиболее широкое применение получил инжекционный способ с использованием прямого смещения p - n перехода, основным достоинством которого является высокое быстродействие (единицы наносекунд).

Известно несколько устройств ввода информации на основе инжекционного способа с использованием p - n перехода. На рисунке 2.2,а приведена простейшая схема ввода цифровой информации. Во время записи p - n переход смещается в прямом направлении и инжектирует в потенциальную яму входного ПЗС зарядовый пакет дырок. Для записи информации (логической «1») в первую ячейку регистра используется затвор $З_{ВХ}$ входного ПЗС, на который подается отрицательное напряжение $|U_{ВХ}| > |U_0|$, где U_0 – пороговое напряжение – минимальное напряжение, при котором образуется инверсный слой. В результате под затвором $З_{ВХ}$ образуется инверсионный канал проводимости и инжектированный заряд из входной ячейки перетекает в первую ячейку секции переноса. При этом величина удельного информационного заряда $Q_{И}$ будет определяться разностью напряжений на затворах 1 и $З_{ВХ}$

$$Q_{И} = S \cdot C_d \cdot (|U_{31}| - |U_{ВХ}|), \quad (2.1)$$

где S – площадь затвора; C_d – удельная емкость диэлектрика.

Для ввода аналоговых сигналов широкое распространение получил, так называемый, способ *инъекции-экстракции* или *способ уравнивания потенциалов*. На рисунке 2.3 приведена одна из схем реализации данного способа.

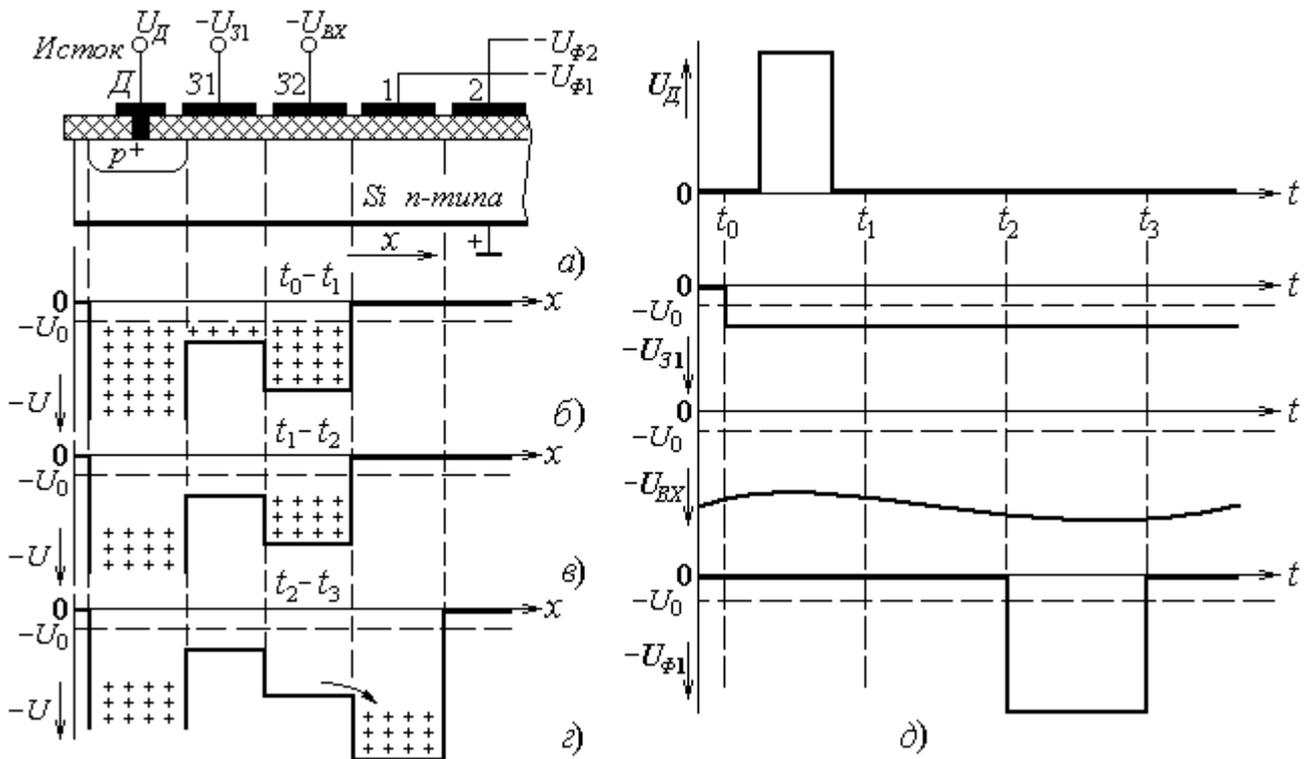


Рисунок 2.3 – Устройство и принцип функционирования секции ввода

Устройство ввода (рисунок 2.3, а) состоит из входного диода (D) и двух входных затворов – 31 и 32. На рисунке приведена также пара электродов (1 и 2) из секции переноса регистра сдвига. На рисунках 2.3, а-г приведены эпюры распределения потенциалов напряжения под управляющими электродами в различные интервалы времени, а на рисунке 2.3, д представлены временные диаграммы напряжений, прикладываемых к управляющим электродам.

Рассмотрим принцип функционирования устройства на примере ввода информационного заряда в первую ячейку секции переноса. В начальный период времени (t_0-t_1) (см. рисунок 2.3, д) на затвор 31 подается постоянное, отрицательное напряжение $|U_{31}| > |U_0|$, так что под затвором образуется инверсионный канал проводимости (рисунок 2.3, б). На затвор 32 прикладывается входной сигнал U_{BX} , модуль которого выбирается так, чтобы глубина ямы под затвором 32 была больше, чем под затвором 31 ($|U_{BX}| > |U_{31}|$) на величину пропорциональную информационному заряду. В это же время на p -область подается положительный импульс U_D ($|U_D| > |U_{32}|$) и потенциальные ямы заполняются инжектированными в p^+ -области дырками (рисунок 2.3, б).

После окончания импульса ($U_D = 0$) избыточный заряд стекает обратно в p^+ -область, а под затвором 32 остается информационный заряд $Q_{И}$ (рисунок 2.3, в), пропорциональный разности напряжений $|U_{BX}| - |U_{31}|$.

$$Q_{И} = S \cdot C_d \cdot (|U_{BX}| - |U_{31}|). \quad (2.2)$$

С целью повышения точности ввода информации напряжение U_{31} должно быть стабильным ($U_{31} = const$).

В момент времени t_2 на затвор 1 секции переноса подается большое отрицательное напряжение ($|U_1| > |U_{BX}|$) и информационный заряд $Q_{И}$ из-под затвора 32 перетекает под затвор регистра 1 (рисунок 2.3, г).

Данный способ ввода информации рационально использовать при обработке аналоговой информации, когда величина информационного заряда должна быть пропорциональна входному напряжению $Q_{И} \equiv U_{BX}$. При этом входное устройство одновременно осуществляет дискретизацию аналогового входного сигнала. Полоса частот входного сигнала Δf_C , согласно теореме Котельникова, должна быть не более половины тактовой частоты управляющих сигналов регистра сдвига f_0

$$f_0 \geq 2 \cdot \Delta f_C. \quad (3.3)$$

2.4 Устройство вывода информации

Принцип работы устройств вывода основан на преобразовании величины информационного заряда в изменение выходного напряжения или тока. Существуют различные способы и схемы реализации выходных устройств, но наиболее широкое практическое применение получили устройства вывода информации с *плавающей диффузионной областью* (ПДО).

ПДО – это емкость, зараженная и отключенная затем от источника питания, то есть находящаяся под «плавающим» потенциалом. В качестве ПДО может быть использована МОП-емкость с «плавающим затвором» или емкость

обратно смещенного $p-n$ -перехода. Создается ПДО в приповерхностной области подложки рядом с последним электродом сдвигового регистра с помощью диффузии или ионного легирования. Размеры области примерно равны размерам элемента регистра и имеет проводимость, противоположную подложке.

Известны различные схемы реализации выходных устройств с ПДО. Одна из них представлена на рисунке 2.4,а. Устройство включает в себя: транзистор

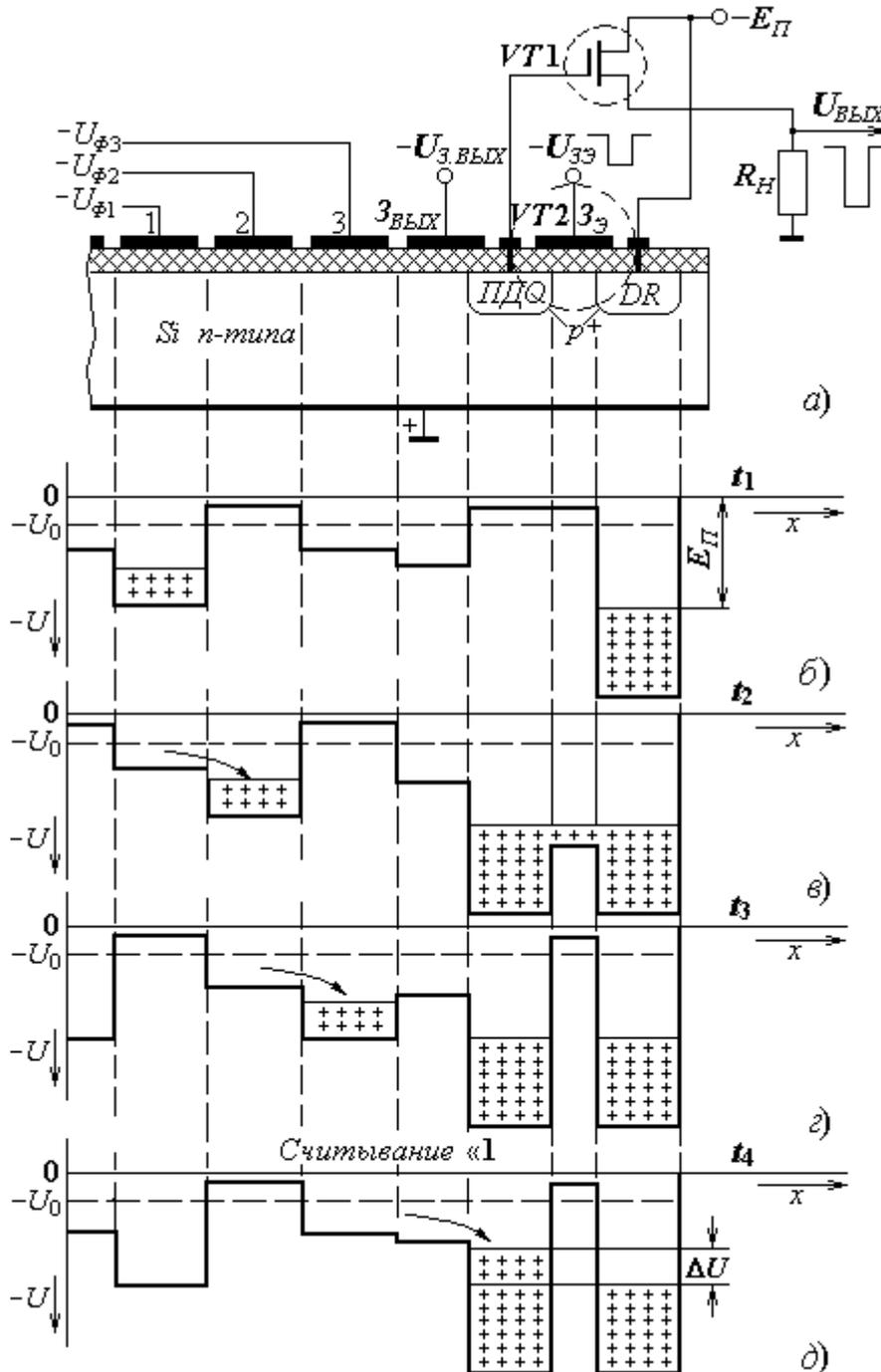


Рисунок 2.4 – Устройство вывода информации

сброса $VT2$ – МОП-транзистор, истоком и стоком которого являются диффузионные области DR и $ПДО$, соответственно, и истоковый повторитель на МОП-транзисторе $VT1$, исток которого соединен с $ПДО$, а в качестве нагрузки ис-

пользуется резистор R_H (порядка нескольких килоом). Схема работает в импульсном (ключевом) режиме.

Диффузионная область DR находится под постоянным, обратным смещением $-E_H$ (см. рисунок 2.4,б). Зарядка $ПДО$ до плавающего потенциала производится путем электрического соединения ее с диффузионной областью DR . При подаче на затвор Z_3 отрицательного импульса (U_{33}) между двумя диффузионными областями образуется проводящий канал и в $ПДО$ устанавливается поверхностный потенциал, равный напряжению источника питания ($-E_H$) (см. рисунок 2.4,в). По окончании управляющего импульса проводящий канал исчезает и $ПДО$ остается заряженной и изолированной, готовой к приему зарядового пакета (рисунок 2.4,,з). Выходной затвор $Z_{ВЫХ}$ находится под постоянным, небольшим отрицательным смещением ($|U_{3.ВЫХ}| > |U_0|$), в результате чего под ним формируется инверсный канал проводимости. При подходе информационного заряда в последнюю ячейку ПЗС регистра сдвига информационный заряд свободно переходит в $ПДО$. Приход зарядового пакета в $ПДО$ вызовет уменьшение ее потенциала на ΔU (см. рисунок 2.4,д)

$$\Delta U = Q_{И} / C_{ПДО}, \quad (3.4)$$

где $Q_{И}$ – величина удельного информационного заряда; $C_{ПДО}$ – удельная емкость $ПДО$. Это изменение потенциала передается на затвор выходного МОП-транзистора $VT1$ и изменяет ток, протекающий через него. В результате на выходе будет иметь место импульс напряжения $U_{ВЫХ}$, амплитуда которого будет пропорциональна величине информационного заряда $Q_{И}$.

После окончания считывания информации необходимо очистить $ПДО$ от «отработанного» заряда. Это достигается при следующем такте открывания транзистора сброса $VT2$. На затвор транзистора сброса Z_3 поступает отрицательный импульс U_{33} , транзистор открывается и зарядовый пакет перетекает из $ПДО$ с меньшим поверхностным потенциалом в диффузионную область DR , соединенную с источником питания. Плавающая область заряжается вновь до напряжения источника питания ($-E_H$) и становится готовой к приему очередного зарядового пакета (рисунок 2.4,в,з).

2.5 Устройство ПЗС – регистра

В подразделе 2.2, на рисунке 2.2,а была представлена структура типичного трехфазного ПЗС–регистра с простейшими устройствами ввода и вывода. Теперь рассмотрим более подробно устройство этого регистра. На рисунке 2.5 показаны вид сверху (а) и поперечное сечение (б) трехфазного ПЗС-регистра, содержащего два бита. Здесь секция переноса представлена шестью МОП-конденсаторами (1-6), присоединенными к шинам ($\Phi 1$, $\Phi 2$, $\Phi 3$) тактового генератора. Входная и выходная секции состоят из входного диода $D_{ВХ}$ с входным затвором $Z_{ВХ}$ и выходного диода $D_{ВЫХ}$ с выходным затвором $Z_{ВЫХ}$, соответственно. Совокупность входного и выходного устройств и секции переноса можно рассматривать как многозатворный МОП-транзистор. Активная площадь прибора окружена диффузионной областью n^+ -типа (косая штриховка),

препятствующей образованию инверсного слоя. Одним из существенных недостатков трехфазных ПЗС является неустранимое пересечение шин управления тактового генератора. В данном варианте конструкции электроды второй фазы подключены к тактовой шине $\Phi 2$ с помощью диффузионной области p^+ -типа (выделена точечной тушевкой), проходящей под шиной $\Phi 3$. Решение этой проблемы возможно и другими способами, например, с помощью многоуровневой металлизации. Области p^+ -типа входного и выходного диодов также выделены точечной тушевкой. В качестве диэлектрика использована двуокись кремния SiO_2 . Электроды затворов и шины выполнены из алюминия.

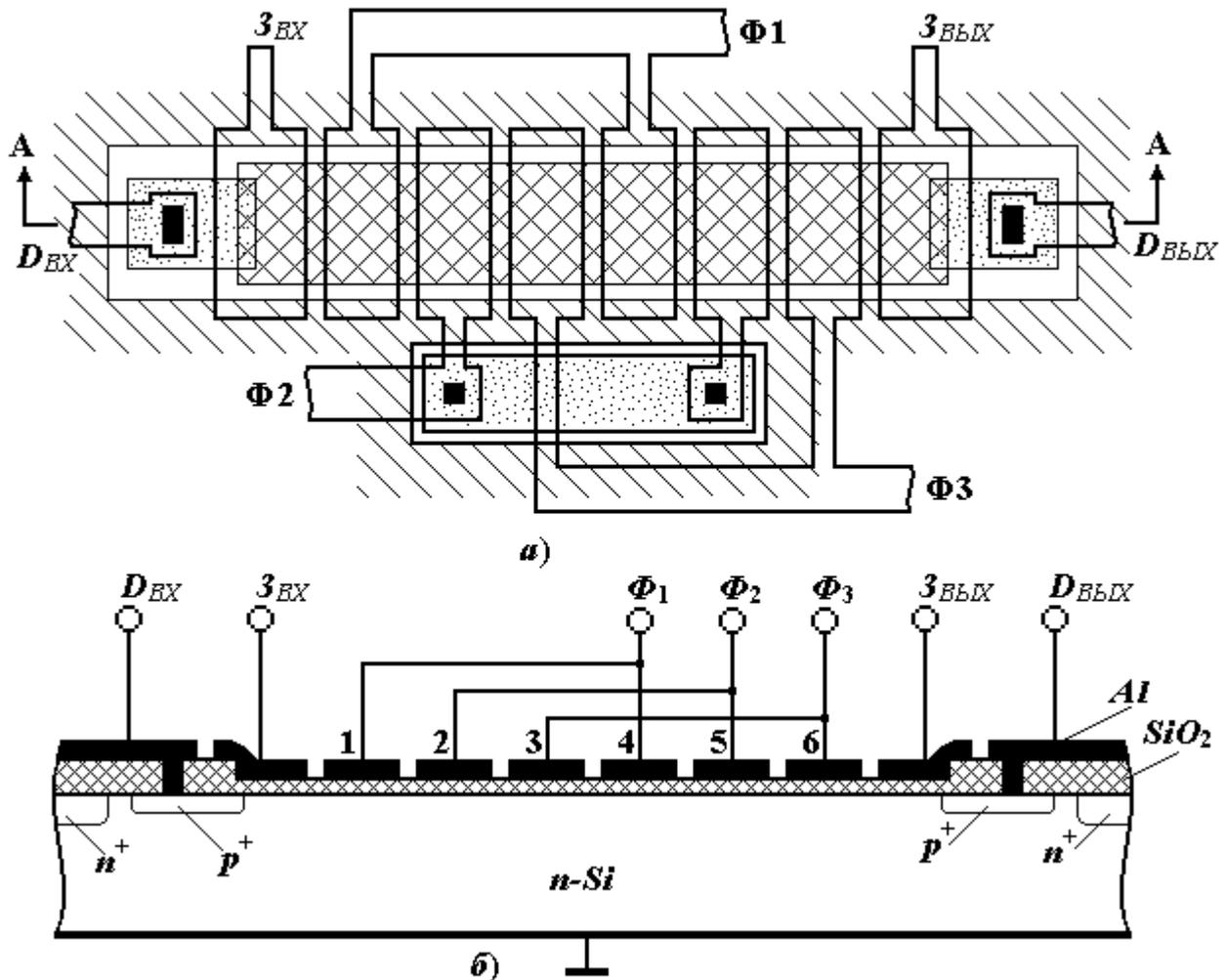


Рисунок 2.5 – Устройство трехфазного ПЗС – регистра

Принцип функционирования ПЗС-регистра рассмотрен в подразделе 2.2.

3 ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ ПЗС. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Передача информационного заряда из элемента ПЗС1 в элемент ПЗС2 осуществляется приложением к соседнему электроду *напряжения записи*, большего *напряжения хранения* ($|U_{зап}| > |U_{хр}|$). В зазоре между электродами возникает *тянущее поле*, под действием которого дырки перетекают в более глубокую потенциальную яму (рисунок 3.1).

В начальный момент приложения напряжения записи $U_{ЗАП}$ в зазоре между ячейками напряженность электрического поля столь велика, что дырки, находящиеся у правой границы ПЗС1, практически мгновенно переходят в ПЗС2. По мере перетекания заряда из ПЗС1 в ПЗС2 концентрация дырок в ПЗС1 уменьшается, поверхностный потенциал увеличивается (по абсолютной величине), а в ПЗС2 уменьшается. В результате этого напряженность поля в зазоре уменьшается и процесс передачи заряда замедляется. Исследования показывают, что процесс переноса заряда, особенно, на заключительной стадии, носит диффузионный характер.

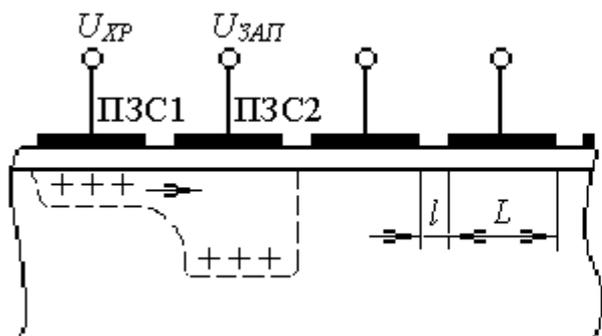


Рисунок 3.1 – Схема передачи заряда в ПЗС

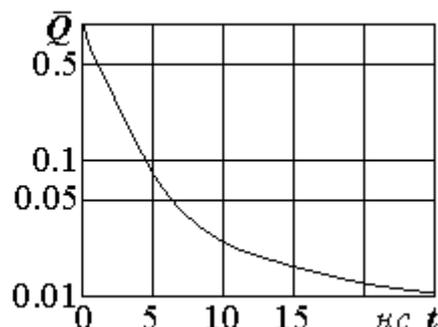


Рисунок 3.2 – Зависимость нормализованного заряда от времени передачи

На рисунке 3.2 приведена экспериментальная переходная характеристика передачи нормализованного заряда $\bar{Q}(t) = Q_H(t)/Q_H(0)$ для ПЗС с параметрами: ширина электрода $L = 6 \text{ мкм}$; поверхностная эффективная подвижность дырок $\mu_{PЭ} = 180 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ [2]. Анализ переходной характеристики показывает, что в начальной стадии убывание заряда в ПЗС1 идет по закону, близкому к гиперболическому,

$$\bar{Q}(t) \sim 1/t. \quad (3.1)$$

В заключительной же части заряд убывает экспоненциально

$$\bar{Q}(t) \sim \exp(t \cdot \mu_{PЭ} / L^2) \quad (3.2)$$

с постоянной времени $\tau_{ПЕР}$

$$\tau_{ПЕР} = 4L^2 / \pi \mu_{PЭ}. \quad (3.3)$$

Из проведенного анализа переходного процесса очевидно, что за конечное время переноса $t_{ПЕР}$ полной передачи информационного заряда из одной потенциальной ямы в другую не происходит. Для количественной оценки коэффициента передачи информационных зарядов в ПЗС используют параметр **эффективности передачи заряда** η , показывающий, какая доля заряда переносится из одной потенциальной ямы i в другую $i+1$,

$$\eta = \frac{Q_{И.ПЗС2}}{Q_{И.ПЗС1}} = \frac{(Q_1 - Q_0)_{i+1}}{(Q_1 - Q_0)_i}. \quad (3.4)$$

Здесь Q_1 и Q_0 – величины заряда, эквивалентные логическим «1» и «0», соответственно.

При заданном допустимом уменьшении зарядового пакета значение η определяет максимальное количество элементов (ячеек), через которое информация может быть передана без искажения. Обычно для многоэлементных ПЗС эта величина выбирается на уровне, близком к 1 ($\eta = 0,99\dots 0,9999$). Поэтому для оценки качества ПЗС чаще используется *коэффициент потерь (неэффективность передачи зарядового пакета)*

$$K_{П} = 1 - \eta. \quad (3.5)$$

В области низких и средних частот также будут иметь место потери информационного заряда, что связано, прежде всего, с явлением захвата носителей поверхностными «ловушками». Влияние поверхностных «ловушек» на процесс переноса проявляется двояко. Во-первых, уменьшается общий заряд передаваемого пакета дырок, т. е. уменьшается уровень логической «1». Во-вторых, захваченные ловушками захвата и освободившиеся через некоторое время носители заряда могут попасть в пустые потенциальные ямы, исказив тем самым уровень логического «0». Таким образом, эффективность передачи заряда зависит как от плотности поверхностных ловушек и величины зарядового пакета, так и от предшествующей зарядовой информации, передаваемой через данный элемент. Наихудшим случаем с точки зрения потерь является передача чередующейся последовательности логических «1» и «0». В этом случае коэффициент потерь $K_{П1}$, обусловленный влиянием поверхностных «ловушек», может быть рассчитан по формуле

$$K_{П1} \approx \frac{qkTN_{Л}}{C_{Д}(U_{3} - U_{0})} \ln(m + 1), \quad (3.6)$$

где $N_{Л}$ – плотность поверхностных ловушек; q – величина элементарного заряда; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К = $8,625 \cdot 10^{-5}$ эВ/К – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура подложки; $m = 2, 3\dots$ – количество управляющих тактов; $C_{Д}(U_{3} - U_{0})$ – величина зарядового пакета. В типичных структурах $K_{П1} = (2\dots 3) \cdot 10^{-3}$ и в первом приближении не зависит от тактовой частоты.

Кроме указанных выше факторов, на искажения информационного заряда также влияют процессы *термогенерации зарядов* в потенциальной яме за время хранения. Эти заряды получили название *паразитных зарядов*. Чтобы уменьшить влияние паразитного заряда на полезную информацию, ограничивается *время хранения информационного заряда* $t_{ХР}$ – это время хранения информационного заряда, в течение которого в ячейке накапливается паразитный заряд, составляющий не более 1% от информационного заряда.

К числу важнейших параметров ПЗС, кроме отмеченных выше, относятся:

- *амплитуды управляющих напряжений* – хранения $U_{ХР}$ и записи $U_{ЗАП}$;
- *предельные тактовые частоты* – нижняя f_{min} и верхняя f_{max} , так как ПЗС является типично динамическим устройством;
- *потребляемая мощность* P и др.

Минимальное напряжение хранения $U_{ХР}$ определяется величиной информационного заряда $Q_{И}$. Чтобы локализовать заданную величину заряда $Q_{И}$,

необходимо обеспечить достаточную *глубину потенциальной ямы* ПЗС, величина которой и определяется напряжением хранения U_{XP} . В свою очередь величина информационного заряда $Q_{И}$ определяется требованиями к выходному сигналу ПЗС.

Минимальное напряжение записи $U_{ЗАП}$ определяется из условия полной передачи заряда через зону и зависит от ширины зазора между электродами l (см. рисунок 3.1) и от концентрации примеси в подложке N_D [6, рисунок 2.7].

Нижний предел тактовой частоты f_{min} определяется максимально допустимым временем хранения информационного заряда в одном элементе $t_{XP,max}$

$$f_{min} = 1/(m \cdot t_{XP,max}), \quad (3.7)$$

где m – количество управляющих тактов. В свою очередь $t_{XP,max}$ определяется допустимым уровнем паразитного заряда $Q_{И,ПАР}$, который влияет на уровень логического нуля, повышая заряд дырок в пустых потенциальных ямах. В зависимости от температуры и свойств материала заметное накопление дырок в пустых потенциальных ямах может произойти за время от сотых долей до единиц секунд. Поэтому *нижний предел рабочих частот* для ПЗС лежит в диапазоне *единиц - десятков кГц*.

Верхний предел тактовой частоты f_{max} определяется длительностью процесса передачи зарядового пакета из одного элемента в другой. При работе с максимальной частотой сразу за тактом записи информации в данный элемент начинается передача информации в следующий, то есть интервал хранения используется только для передачи информации. Поэтому минимальная длительность интервала хранения $t_{XP,min} = t_{ПЕР}$ и, соответственно, максимальная тактовая частота

$$f_{max} = 1/(m \cdot t_{ПЕР}), \quad (3.8)$$

где время передачи $t_{ПЕР}$ при заданной эффективности передачи η может быть приближенно определено по номограммам (рисунок 3.4). Так как время передачи составляет порядка единиц наносекунд, то *верхний предел тактовых частот* для ПЗС определяется обычно *десятками мГц*.

Время передачи информационного заряда $t_{ПЕР}$ на высоких частотах при заданной эффективности η примерно пропорционально $L^2/\mu_{pЭ}$. На рисунке 3.4 приведены расчетные кривые для времени передачи заряда при следующих параметрах: толщина диэлектрика $x_D = 0,1$ мкм; поверхностная эффективная подвижность дырок $\mu_{pЭ} = 180$ см²/(В·с); эффективность передачи заряда $\eta = 0,99$; абсолютная температура подложки $T = 300$ К.

Таким образом, время передачи заряда из ячейки в ячейку $t_{ПЕР}$ пропорционально концентрации примеси N_D и квадрату ширины электрода L и обратно пропорционально эффективности передачи заряда η и поверхностной эффективной подвижности зарядов $\mu_{pЭ}$.

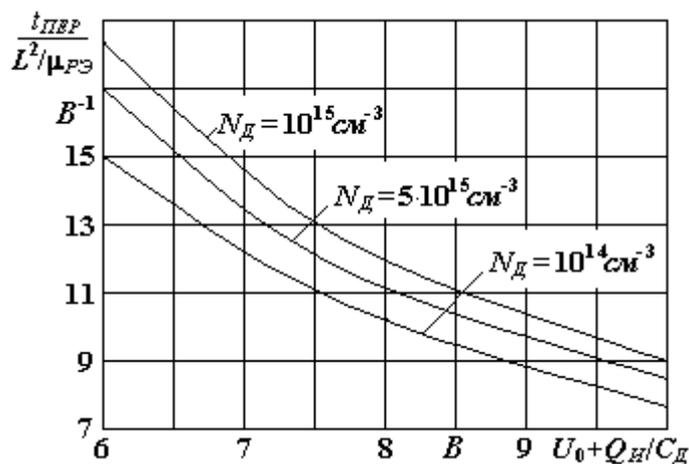


Рисунок 3.4 – Расчетные номограммы для времени передачи заряда

Потребление энергии в ПЗС происходит практически только в режиме передачи на перенос информационного заряда. При этом потребляемая мощность пропорциональна величине передаваемого заряда и тактовой частоте. В режиме хранения ток электропроводности через управляющие электроды затворов ПЗС практически не проходит, так как затворы изолированы от полупроводника (подложки) слоем хорошего диэлектрика – двуоксида кремния. Поэтому потерями за счет протекания токов утечки и термогенерации можно пренебречь.

Полная энергия, отдаваемая генератором тактовых импульсов за один цикл передачи в трехтактной схеме, определяется произведением полного заряда пакета, равного ZLQ_H , на разность потенциалов между ячейками

$$W_1 = ZLQ_H(U_{ЗАП} - U_{ХР}), \quad (3.9)$$

где Z и L – длина и ширина электродов затвора.

4 ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

В данной лабораторной работе исследуется однострочный приемник изображения. Конструктивно он выполнен в металлокерамическом корпусе с оптическим окном из лейкосапфира, прозрачного во всей области спектральной чувствительности микросхемы. В интегральную схему входят следующие функциональные элементы: устройство ввода фонового заряда, два параллельных сдвиговых регистра, устройство вывода информации. Устройство ввода служит для введения некоторого фонового заряда при работе ПЗС-регистра, что уменьшает неэффективность переноса. Параллельные сдвиговые регистры имеют общие затворы, смещенные вдоль направления переноса на 1,5 мкм. Каналы переноса двух регистров разделены высоколегированной p -областью (стоп-диффузия). Каждый из регистров служит для передачи одной полустроки. ПЗС-регистры используются в режиме накопления как фоточувствительные линейки и в режиме считывания как сдвиговые аналоговые регистры. Затворы изготовлены из поликристаллического кремния толщиной 0,5 мкм. Регистр пред-

ставляет собой обычный четырехфазный ПЗС. Для отсчета уровня черного часть элементов в начале и конце регистра закрыта слоем алюминия. Данный ПЗС может быть использован в качестве линии задержки с коэффициентом передачи равным 0,3.

Изучение конструкции микросхемы производится с помощью микроскопов МБС-9 и МИМ-7. Для измерения размеров электродов и длины ПЗС регистра используется МИМ-7. Настройка на резкость микроскопа МИМ-7 осуществляется ГРУБО перемещением держателя образца вверх-вниз с помощью сдвоенных ручек. После фиксирования держателя винтовым зажимом ТОЧНАЯ НАСТРОЙКА осуществляется микровинтом, расположенным с правой стороны микроскопа. При настройке на резкость следует учитывать, что фокусные расстояния объектива составляют около одного миллиметра.

Перемещение образца в горизонтальной плоскости осуществляется с помощью двух микровинтов, расположенных на предметном столике. При измерении длины ПЗС регистра перемещение предметного столика следует измерять *штангенциркулем*. Измерение размеров электродов регистра осуществляется *объект-микрометром*. Для этого, используя эталонную линейку с ценой деления 10 мкм, определить цену деления барабана, а затем измерить размеры электродов.

5 ЗАДАНИЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

7.1 Изучить топологию ПЗС-прибора. С использованием микроскопа определить размеры затворов переноса. Определить количество фазовых напряжений, прикладываемых к ПЗС-регистру. Оценить время задержки при переносе информационного заряда от входа к выходу. Учесть при этом, что тактовая частота $f_0 = 100 \text{ кГц}$.

7.2 Выполнить фрагмент эскиза топологии и вертикального сечения ПЗС-регистра.

7.3 Нарисовать эскиз топологии и вертикального сечения устройств ввода и вывода.

7.4 Оценить эффективность переноса заряда из ячейки в ячейку η , если коэффициент потерь ПЗС-регистра составляет величину $K_{\Pi} = 0,01$.

7.5 Определить максимальную тактовую частоту f_{max} для трехтактного регистра, если: концентрация примеси в подложке $N_D = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$; поверхностная эффективная подвижность дырок $\mu_{p\text{Э}} = 180 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$; толщина диэлектрика (SiO_2) $x_D = 0,1 \text{ мкм}$; величина информационного заряда $= 2 \cdot 10^{-3} \text{ Кл/м}^2$; пороговое напряжение $U_0 = 2,3 \text{ В}$.

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

5.1 Что понимается под приборами с зарядовой связью? В чем их существенное отличие от интегральных микросхем?

5.2 Что такое МДП- и МОП-конденсаторы?

5.3 Что такое неравновесное обеднение носителей заряда?

5.4 Назначение и принцип функционирования входного и выходного устройств ПЗС-регистра?

5.6 Физическая сущность переноса информационного заряда из одной ячейки в другую в ПЗС-приборах?

5.7 Что понимается под эффективностью передачи заряда и коэффициентом потерь? От каких факторов зависит эффективность передачи заряда?

5.8 Чем определяется минимальная и максимальная тактовая частота?

5.9 Что понимается под временем хранения и временем передачи информационного заряда?

5.10 Как определить время задержки сигнала в ПЗС-регистре?

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1 Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы: Учебник для вузов. – СПб.: Изд-во «Лань», 2001. – 480 с.

2 Носов Ю.Р., Шилин В.А. Полупроводниковые приборы с зарядовой связью. – М.: Сов. Радио, 1976, 144 с.

3 Носов Ю.Р., Шилин В.А. Основы физики приборов с зарядовой связью. – М.: Наука, 1986. – 320 с.

4 Приборы с зарядовой связью./Под ред. М.Хоувза и Д.Моргана: Пер. с англ. – М.: Энергоиздат, 1981. – 376 с.

5 Пресс Ф.П. Формирователи видеосигнала на приборах с зарядовой связью. М.: Радио и связь, 1981.- 136 с.

6 Кузубных Н.И. Физика функциональных устройств: Учебное пособие. – Томск: ТУСУР, 2007. – 152 с.