

Министерство образования и науки российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

КАФЕДРА ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ (ЭП)

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МДП - СТРУКТУР

Методическое пособие к лабораторной работе
по дисциплине «Твердотельная электроника»
для студентов направления подготовки
200100.62 – «Электроника и наноэлектроника»,

Разработчик:
профессор кафедры ЭП
_____ В.Н. Давыдов

«15 » декабря 2013 года

ТОМСК – 2013

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ
2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ
 - 2.1. Основные понятия и параметры
 - 2.2. Энергетическое состояние поверхности в электрическом поле
 - 2.3. Вольт-фарадные характеристики МДП-структуры.
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ
 - 3.1. Методика измерений емкости МДП-структуры
 - 3.2. Описание экспериментальной установки
 - 3.3. Практическое руководство по проведению измерений
 - 3.4. Задание к лабораторной работе
4. ТРЕБОВАНИЯ К ОСТАВЛЕНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА
5. ЛИТЕРАТУРА

1. ВВЕДЕНИЕ

Важным направлением развития электронной техники является миниатюризация ее элементов и приборов. В конце 60-тых годов начала развиваться новая технология их изготовления – планарная технология. Основным ее отличием от предшествующих технологий являлось изготовление приборов, принцип работы которых основан на электронных процессах, протекающих в приповерхностном слое полупроводника при приложении к нему электрического поля. Таким способом оптимально решались две задачи: во-первых, нанесением на поверхность диэлектрического слоя малой толщины осуществлялась ее защита (пассивация) от случайных внешних воздействий, что резко повышало стабильность прибора и срок его службы; во-вторых, через диэлектрик прикладывалось электрическое поле, что исключало токи проводимости и снижало энергопотребление планарного устройства.

В этой связи дальнейший прогресс в развитии твердотельной электроники связан с изучением электронных свойств приповерхностных слоев полупроводников, свойств межфазных границ типа «диэлектрик - полупроводник». По этим причинам изучение свойств структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) представляется важным как для понимания принципа работы всех поверхностно-барьерных приборов современной твердотельной электроники, так и современных методов исследования их параметров.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1. Основные понятия и параметры

Почему при изучении поверхностных свойств полупроводников и их контакта с другими материалами приходится учитывать особенности строения, так и электрических свойств приповерхностных слоев полупроводников? Дело в том, что эти особенности оказались столь существенными, что именно на них стали создавать новые полупроводниковые приборы: так называемые **поверхностно-барьерные структуры**, к которым относят структуры «металл-диэлектрик-полупроводник» (МДП), «металл-полупроводник» и т.д. Для полного понимания излагаемого материала рассмотрим основные параметры и понятия, используемые при рассмотрении МДП-структур.

Поверхностные состояния. В первую очередь особенности поверхности полупроводника проявляются в энергетическом спектре электронов, находящихся вблизи поверхности.

Действительно, энергетическое состояние электрона у поверхности отличается от его состояния в объеме полупроводника. Это связано с рядом причин. Главная из них заключается в том, что поверхность представляет собой один большой структурный дефект, т.к. на ней решетка обрывается и потому имеются атомы с разорванными связями.

Эти разорванные ковалентные связи способны захватить по два электрона, но у атомов поверхностного атомного слоя со стороны вакуума подобных ему соседей нет. Поэтому недостающие электроны захватываются поверхностными атомами из валентной зоны или зоны проводимости полупроводника. В результате у электронов появляется возможность кроме разрешенных зон энергии занять эти разрешенные уровни энергии, которые ввиду их местоположения называют **поверхностными состояниями** (ПС) Тамма по фамилии ученого, впервые обратившего внимание на их наличие и специфическую природу. Концентрация поверхностных состояний Тамма предельно велика и достигает 10^{15} см^{-2} .

Однако этими состояниями не исчерпываются все возможные варианты с состояниями, связанными с особым статусом поверхности. Выделяют еще ПС типа Шокли, появление которых обусловлено изменениями в точечной симметрии приповерхностного слоя как за счет изменений самой точечной группы (появление элементов гексагональной симметрии в приповерхностном слое кубического кристалла), так и за счет замыкания ковалентных связей соседних атомов друг на друга и т.д.

В дополнение к состояниям Тамма и Шокли имеется возможность появления ПС еще одного вида, происхождение которых связано с образованием на поверхности особых структурных дефектов: частичных и полных дислокаций, кластеров и преципитатов, а также загрязнением химическими веществами, использованными в технологии обработки поверхности полупроводника и при нанесении диэлектрика.

Итак, поверхностные состояния – это разрешенные состояния для электрона, которые локализованы на поверхности полупроводника и которые обусловлены нарушениями структуры приповерхностного слоя полупроводника, а также возможными способами доформирования разорванных ковалентных связей у поверхностных атомов.

Плотность поверхностных состояний. При определении количества поверхностных состояний целесообразно рассчитывать его на единичную площадь поверхности полупроводника, определяя тем самым их поверхностную концентрацию, например, $1/\text{см}^2$. Плотность поверхностных состояний принято обозначать символом N_{SS} .

Однако поверхностные состояния сказываются на параметрах МДП-структур, если локализованы в запрещенной зоне полупроводника. Тогда при изменении напряжения на МДП - структуре и вызванного этим смещении уровня Ферми на поверхности по энергии ПС могут изменять свое зарядовое состояния: донорные состояния выше уровня Ферми заряжены положительно, а ниже уровня – нейтральны, акцепторные состояния ниже уровня Ферми отрицательно заряжены, а выше уровня Ферми – нейтральны. Поэтому чтобы учесть возможное неравномерное распределение ПС по ширине запрещенной зоны наряду с их

плотностью по площади вводят плотность по единичному энергетическому интервалу. Энергию запрещенной зоны полупроводника обычно измеряют в электроновольтах – эВ. Поэтому нормировка на энергию даст в размерности ПС обратную энергию.

Таким образом, плотность поверхностных состояний (ППС) будет означать количество возможных электронных состояний на единичной поверхности полупроводника в единичном интервале энергий и будет иметь размерность $\text{см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$. Пример записи плотности поверхностных состояний: $N_{\text{SS}} = 2.2 \cdot 10^{12} \text{см}^{-2} \text{эВ}^{-1}$.

Распределение ППС по энергии. Если пронормировать поверхностную концентрацию ПС на ширину запрещенной зоны полупроводника, то получающаяся плотность ПС будет средней по запрещенной зоне, т.е. постоянной величиной. Однако в реальных МДП-структурах в зависимости от энергии в запрещенной зоне полупроводника плотность ПС может сильно изменяться. Действительно, концентрация структурных нарушений поверхности полупроводника тем больше, чем меньше энергии требуется на их образование. Следовательно, если смотреть по запрещенной зоне полупроводника величина ППС должна возрастать к дну зоны проводимости и при приближении к потолку валентной зоны. Закон возрастания $N_{\text{SS}}(E)$ к краям запрещенной зоны носит экспоненциальный характер, что соответствует статистике Максвелла-Больцмана.

Фиксированный заряд в диэлектрике. Как указывалось, для исключения неконтролируемого формирования поверхности полупроводника и стабилизации его свойств его защищают диэлектрической пленкой, как правило, пленкой собственного диэлектрика. Так, у кремния окисная пленка имеет аморфную структуру и химическую формулу SiO_2 . Сформированная из ионов кремния и кислорода и содержащая примесные ионы (натрий, водород, гидроксильные группы и т.д.) диэлектрическая пленка приобретает некоторый заряд в объеме. Его создают указанные ионы, расположенные в объеме окисной пленке и у границы с полупроводником. Этот электрический заряд обнаруживается в электрических измерениях как фиксированный (т.е. неизменный во времени) заряд в диэлектрике, существенно сказываясь на параметрах и характеристиках поверхностно-барьерной структуры.

Емкость полупроводника. Понятие емкости можно ввести для любого объекта, проявляющего свойство накапливать электрический заряд Q при приложении к нему напряжения V : $C = Q/V$. Из-за наличия у границы «полупроводник – диэлектрик» потенциального барьера для электронов и дырок, препятствующего их уходу из полупроводника, при приложении к нему электрического поля, накопление заряда у поверхности можно рассматривать как проявление емкостных свойств

полупроводника. В данном тексте речь идет о приповерхностном слое, т.к. заряд у поверхности локализуется в пределах некоторого слоя от границы раздела, а не строго на поверхности из-за взаимного расталкивания одноименных свободных носителей.

2.2. Энергетическое состояние поверхности в электрическом поле

Наличие на поверхности полупроводника потенциального барьера для электронов и дырок, а также дополнительных состояний энергии для них приводят к появлению вблизи поверхности полупроводника новых свойств, которые с успехом используются в электронном приборостроении. Особые электрические свойства приповерхностных слоев полупроводников исследуют с помощью структуры металл – диэлектрик – полупроводник (МДП).

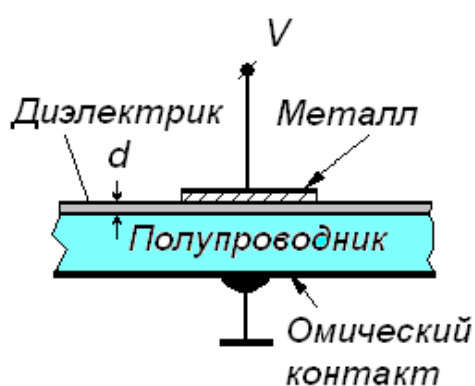


Рис.1

Необходимость диэлектрического слоя вызвана потребностью создания вблизи поверхности электрического поля без появления омического тока, а металлический электрод задает размеры области воздействия поля. Схематически вид МДП-структуры показан на рис. 1. Здесь d - толщина диэлектрика, V - прикладываемое к структуре напряжение.

Энергетическая диаграмма МДП-структуры при отсутствии внешнего напряжения V показана на рис. 2. Здесь в левой части показана энергетическая диаграмма металла, из которого изготовлен полевой электрод МДП-структуры. Далее следует энергетическая диаграмма диэлектрика, использованного для изоляции поверхности полупроводника от металлического электрода. Правая же часть рис. 2 отображает энергетическую диаграмму полупроводника. Используемые на рисунке обозначения таковы: E_C , E_V - энергии дна зоны проводимости и потолка валентной зоны полупроводника; E_F - энергия уровня Ферми, который в равновесных условиях имеет одинаковое значение во всех трех слоях МДП-структуры. Для определенности рассматривается полупроводник p - типа; E_i - энергия середины запрещенной зоны полу-

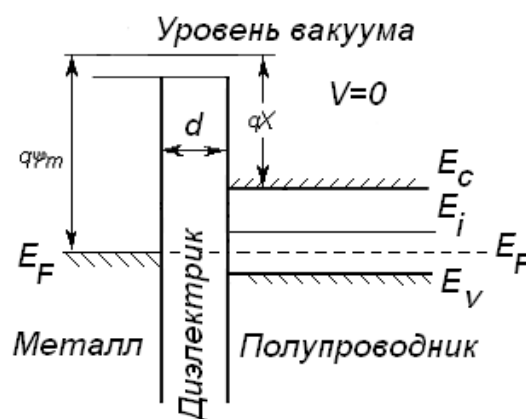


Рис.2

проводника. Энергия электрона, эмиттированного из полупроводника (диэлектрика) в вакуум с нулевой кинетической энергией, отмечена на рисунке как «уровень вакуума». Работа выхода электронов из металла обозначена как φ_m , сродство к электрону материала полупроводника - χ . Вводят также объемный потенциал полупроводника φ_b , определяя его как

$$\varphi_b = \frac{E_i - E_F}{q}.$$

Фактически он характеризует уровень легирования полупроводника акцепторной примесью (ее уровень на рис.2 не показан).

Если к полевому электроду приложить постоянное электрическое напряжение, то ввиду отсутствия омического тока через диэлектрик в приповерхностном слое полупроводника будет действовать электрическое поле. Оно локализовано в тонком приповерхностном слое (обычно меньше 10^{-6} м) и, следовательно, искажает энергетическую диаграмму приповерхностного слоя полупроводника, изгибая энергетические зоны в области локализации поля. Электрическое поле приповерхностного слоя полупроводника вызовет дрейф свободных электронов и дырок к поверхности одних и в объем – других в зависимо-

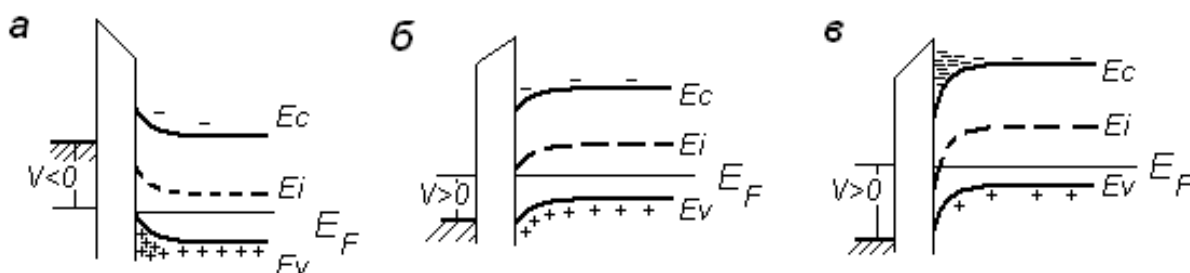


Рис.3

ти от знака приложенного напряжения. Так, если основу МДП-структуры составляет дырочный полупроводник, то при приложении к металлическому (его называют «**полевым**») электроду отрицательного напряжения $V < 0$ на границе раздела «полупроводник-диэлектрик» будут скапливаться дырки. Такой режим называют **режимом обогащения**, т.к. приповерхностный слой полупроводника обогащен основными носителями (см. рис.3, а). Если к полевому электроду приложено малое положительное напряжение $V > 0$, то от поверхности уходят дырки. Этот режим называют **режимом обеднения**, т.к. поверхность обеднена основными носителями (рис.3, б). В этом режиме экранировка внешнего электрического поля осуществляется неподвижными ионами донорной примеси. Толщина слоя экранирующих ионов в полупроводнике определяется **дебаевской длиной**

экранирования L_D , которая в свою очередь, определяется концентрацией акцепторной (донорной) примеси:

$$L_D = \sqrt{\frac{\varepsilon_s \varepsilon_0 k T}{q^2 N_a}}$$

При больших положительных напряжениях наряду с уходом дырок от поверхности сказывается еще один процесс: накопление электронов. Следовательно, в этом режиме работы МДП-структуры приповерхностный слой содержит электроны - неосновные носители заряда, которые имеют инверсный заряд по отношению к заряду основных носителей заряда. Поэтому данный режим называют **режимом инверсии поверхности** (рис.3, в). В этом режиме достигается наибольшая толщина слоя объемного заряда в приповерхностном слое, равная

$$W = \sqrt{\frac{4\varepsilon_s \varepsilon_0 k T}{q^2 N_a} \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right)}. \quad (1)$$

Следовательно, в режиме инверсии поверхности емкость МДП-структуры минимальна - C_{min} .

Отдельный интерес представляет **режим плоских зон**, в котором изгиб зон отсутствует (рис. 2). В этом режиме прикладываемое напряжение V^0 точно компенсирует изгиб зон, вызванный различными значениями работы выхода из полупроводника φ_s и металла φ_M : $\Delta\varphi = \varphi_M - \varphi_s$, а также из-за наличия в диэлектрике фиксированного заряда. Регистрируемая в этом случае емкость структуры определяется дебаевской длиной экранирования:

$$C^0 = \frac{\varepsilon_s \varepsilon_0}{L_D}. \quad (2)$$

Именно в состоянии плоских зон определяется фиксированный заряд в диэлектрике:

$$Q_{фикс} = C_{\partial} \cdot \Delta V, \quad (3)$$

где C_{∂} - емкость диэлектрика, а $\Delta V = V^0$ - сдвиг напряжения на структуре относительно его нулевого значения, при котором на поверхности полупроводника наблюдается состояние плоских зон, а емкость МДП-структуры равна

$$C = \frac{C_{\partial} C^0}{C_{\partial} + C^0} \quad (4)$$

Энергетические диаграммы рассмотренных режимов для полупроводников n -типа отличаются от приведенных рис. 3 обратным изгибом зон у одноименных режимов.

2.3. Вольт-фарадные характеристики МДП-структуры

При рассмотрении МДП-структуры можно видеть, что она аналогична плоскому конденсатору. Его обкладками служат, с одной стороны, металлический электрод, а с другой – приповерхностный слой полупроводника. Разделяющий их диэлектрик – это диэлектрический слой, подобный диэлектрику в плоском конденсаторе. Указанное сходство с плоским конденсатором позволяет говорить о существовании у МДП-структуры емкостных свойств. Однако в отличие от плоского конденсатора, образованного двумя металлическими пластинами, разделенными диэлектриком, наличие полупроводника делает свойства МДП конденсатора принципиально другими. Действительно, емкость конденсатора при известном приложенном постоянном напряжении V определяется величиной накопленного на обкладках заряда Q . Так как обкладкой МДП-конденсатора выступает приповерхностный слой полупроводника, то в соответствии с рассмотренными в предыдущем параграфе его режимами, накопленный заряд сильно зависит от того находится ли приповерхностный слой в режиме обогащения, обеднения или инверсии. В первом и третьем режимах на поверхности находится большое количество основных (режим обогащения) или неосновных носителей заряда (режим инверсии). Следовательно, в этих режимах у поверхности сосредоточен большой заряд - Q_s . В режиме обеднения, наоборот, у поверхности носителей заряда минимальное количество, а основное экранирующее действие внешнего поля оказывают неподвижные ионы легирующей примеси. Поэтому в этом режиме при изменении на единицу напряжения на структуре изменения Q_s будут меньше, чем в режимах обогащения и инверсии. Таким образом, зависимость $Q_s(V)$ имеет глубокий минимум в области значений V , соответствующих обеднению. Емкость плоского конденсатора является дифференциальной величиной: она представляет изменение приповерхностного заряда при изменении напряжения на конденсаторе на единицу величины. Математически это записывается так:

$$C_s = \frac{\partial Q_s}{\partial V}.$$

Поскольку Q_s зависит от V нелинейным образом, то $C_s = C_s(V)$ - емкость МДП-конденсатора зависит от величины постоянного напряжения, приложенному к нему. Полная емкость МДП - структуры C_{Σ}

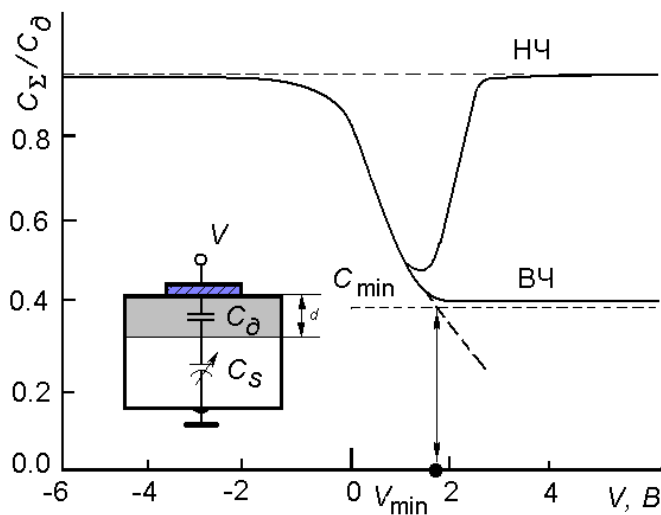


Рис. 4

представляет собой две последовательно соединенные области: диэлектрика C_δ и полупроводника C_s

$$\frac{1}{C_\Sigma} = \frac{1}{C_\delta} + \frac{1}{C_s}$$

Зависимость $C_\Sigma = C_\Sigma(V)$ называется **вольт-фарадной характеристикой (ВФХ)** МДП-структуры. В зависимости от значения частоты измерительного сигнала (дифференциальная емкость может быть

измерена только на слабом переменном сигнале) различают **высокочастотную (ВЧ)** и **низкочастотную (НЧ)** ВФХ. На рис. 4 показана высокочастотная и низкочастотная ВФХ МДП-структуры, изготовленной на основе полупроводника p -типа. Здесь C_δ - емкость диэлектрического слоя, на которую выходит емкость структуры в режиме обогащения и сильной инверсии на НЧ ВФХ; C_{\min} - минимальная емкость структуры, которая достигается в режиме обеднения в режиме инверсии на ВЧ ВФХ. В случае низкой частоты измерительного сигнала емкость структуры в режиме инверсии оказывается большой и при превышении ею емкости диэлектрика будем иметь $C_\Sigma \approx C_\delta$.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

3.1. Методика измерения емкости МДП-структуры

Наиболее простой метод измерения неизвестной емкости заключается в использовании для этого двух последовательно соединенных емкостей, одна из которых подлежит измерению C_x , а другая является эталонной C_δ , т.е. ее значение известно с высокой точностью. Если к этой цепи приложить малое переменное напряжение $U_{\text{мест}}$, то снимаемое с эталонной емкости напряжение будет равно (см. рис.5):

$$U_x = I \cdot \frac{1}{j\omega C_\delta} = \frac{U_{\text{мест}}}{\frac{1}{j\omega C_x} + \frac{1}{j\omega C_\delta}} \cdot \frac{1}{j\omega C_\delta} = \frac{C_\delta}{C_x + C_\delta} U_{\text{мест}}$$

Это выражение можно переписать в виде:

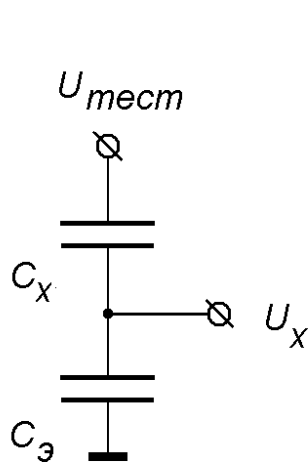


Рис.5

$$\frac{U_x}{U_{мест}} = \frac{C_3}{C_x + C_3}$$

Отсюда найдем:

$$C_x = C_3 \frac{U_x}{1 - \frac{U_x}{U_{мест}}} \quad (5)$$

Данное выражение показывает, что значение неизвестной емкости можно определить по известной эталонной емкости и измеренному падению напряжения на ней переменного тестового сигнала

заданной амплитуды. Важно отметить, что при малых падениях напряжения: $U_x/U_{мест} \ll 1$ между неизвестной емкостью и падением напряжения на эталоне устанавливается линейная связь. При сопоставимых значениях U_x и $U_{мест}$ величина неизвестной емкости C_x зависит от U_x нелинейно. Однако использование средств вычислительной техники позволяет производить вычисление неизвестной емкости по выражению (5) с требуемой точностью.

Заметим, что выражение (5) позволяет выявить условия, при которых измеряемая емкость будет всегда связана линейным законом с измеренным падением напряжения. Для этого необходимо выбрать эталонную емкость по величине значительно больше максимальной измеренной емкости.

3.2. Описание экспериментальной установки

Блок схема экспериментальной установки для измерения вольт-фарадной характеристики МДП – структуры приведена на рис.6. Установка представляет собой автоматизированный комплекс, состоящий из цифровых и аналоговых модулей, которые работают по программе, выполняемой центральным процессором (ЦП) персонального компьютера (PC). Цифровые модули размещены в корпусе системного блока PC (I) и представляют собой аналого-цифровой преобразователь (АЦП), цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), мультиплексор (МУЛ), выходной регистр (ВР) выполнены на отдельных платах, которые подключены к ЦП через шину ISA.

В приборном модуле (II) находится аналоговая часть измерителя емкости. Приборный модуль разбит на два блока, выполненных в одинаковых корпусах и расположенных друг на друге. Нижний блок модуля содержит блоки питания всего приборного модуля, а также аналоговые схемы, реализующие измерения вольт-амперных

характеристик (ВАХ) и фотоэлектрических (ФЭ) характеристик. Верхний блок предназначен для измерения ВФХ полупроводниковой структуры, подключаемой к нему с помощью двух байонетных разъемов, расположенных на задней стенке блока. Там же находятся байонетные разъемы для подключения генератора тестового сигнала (разъем «ТЕСТ»), а также для подключения осциллографа (разъем «ФАЗА»). Подключение к цифровым модулям комплекса, расположенным внутри системного блока РС, осуществляется с помощью 24-хконтактного разъема, расположенного в центре задней стенки верхнего блока. Связь с нижним блоком приборного модуля осуществляется через 9-тиштырьковый разъем в правой части задней стенки. Измеряемая МДП-структура помещается в контактирующее устройство, которое расположено на массивной металлической плите верхнего блока (закреплена сверху блока). Контактное устройство представляет собой подпружиненный игольчатый зонд с массивным нижним контактом. Для исключения влияния электрических наводок, контактирующее устройство помещено в заземленный металлический экран.

Как указывалось в п. 3.1., принцип измерения емкости МДП-структуры основан на емкостном делителе, когда неизвестная емкость МДП-структуры включается последовательно с эталонной емкостью $C_э$, и образовавшаяся цепь емкостей запитывается от генератора тестового сигнала (ГТС). По величине падения напряжения на эталонной емкости можно определить емкость МДП-структуры. Для уверенной регистрации падения напряжения на эталонной емкости снимаемое напряжение усиливается усилителем (ВФХ), Высокое входное сопротивление вход-

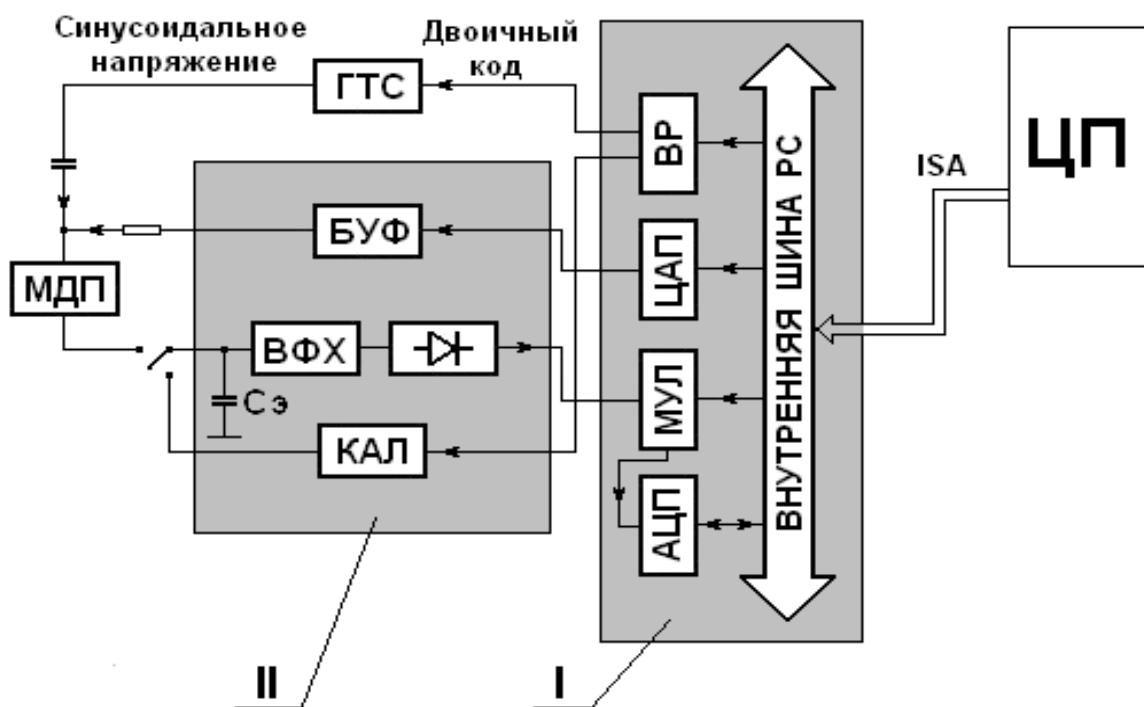


Рис.6

ной микросхемы К544УД2 усилителя исключает шунтирование измеряемого двухполюсника. Последующие каскады усиления собраны на высокочастотных транзисторах, что позволяет получить необходимый коэффициент усиления вблизи верхней границы частотного диапазона измерений. Примененные схемы транзисторных усилителей обладают высокой термостабильностью, широкой полосой пропускания и высоким коэффициентом усиления. Развязка усилителя с квадратичным детектором осуществляется с помощью эмиттерного повторителя. Контроль формы усиленного сигнала производится с помощью осциллографа С1-93 (на рис. 6 не показан).

Усиленный сигнал на частоте тестового сигнала детектируется квадратичным детектором, имеющим линейность не хуже 1,5 % в частотном диапазоне ($10^3 \div 10^6$) Гц. Продетектированный сигнал поступает на один из входов мультиплексора, который передает постоянное напряжение, пропорциональное величине измеряемой емкости на АЦП. После оцифровки оно вводится в РС и хранится в его оперативной памяти как элементы двумерного массива «Емкость - напряжение».

Для изменения состояния поверхности полупроводника, а значит емкости МДП-структуры, используется ЦАП, выходное напряжение которого, задаваемое по программе управления экспериментом, прикладывается к ней через сопротивление 15 МОм, исключающее шунтирование структуры выходным сопротивлением ЦАПа.

В качестве источника тестового сигнала применен промышленно выпускаемый генератор Г4-153, частотой и амплитудой выдаваемого им напряжения можно программно управлять. Для этого на задней стенке генератора находится разъем дистанционного управления. В качестве управляющего сигнала используется двоичный код, состоящий из нулей и единиц. Этот управляющий код составляется в программе управления и записывается в выходной регистр (ВР). Тестовое напряжение с генератора Г4-153 подается через байонетный разъем "ТЕСТ", расположенный на задней стенке прибора.

Для измерения емкости двухполюсника необходимо измерить только одну величину, в качестве которой выбран модуль падения напряжения на эталонной емкости. Метод вычисления измеренной емкости основан на калибровке измерителя по набору эталонных емкостей (конденсаторов с известными значениями емкости) и сравнении измеренного падения напряжения на МДП-структуре с падениями напряжений на эталонных емкостях и вычислению значения измеренной емкости. Для калибровки измерителя емкости в составе комплекса имеется калибратор (КАЛ). Он представляет собой двоично-десятичный дешифратор на микросхеме К155ИД10, каждый из десяти выходов которой нагружен на реле. Эти реле контактами подключают одну из десяти калибровочных емкостей ко входу измерителя (емкости взамен емкости МДП-структуры). Для каждой емкости в массив

калибровочных емкостей и напряжений в память записывается величина получающегося напряжения на выходе измерителя.

Сигнал переключения емкостей поступает на вход дешифратора в виде двоичного кода, формируемого выходным регистром. В качестве одной из калибровочных емкостей - C_{K10} используется закоротка – нулевое омическое сопротивление ($C_{K10} \rightarrow \infty$), что позволяет измерить амплитуду тестового сигнала.

3.3. Практическое руководство по проведению измерений

В данном параграфе описана последовательность действий по работе с комплексом и программой измерения вольт-фарадной характеристики полупроводниковых структур. Прежде чем запустить программу (программа «**Метроном**» находится на рабочем столе РС) необходимо включить автоматизированный комплекс. Для этого на передней панели нижнего блока комплекса необходимо поставить клавишу на блоке в верхнее положение «Включено». При включении комплекса на его передней панели должны загореться индикаторные светодиоды, указывающие на наличие напряжений $\pm 15V$, и $+ 5V$ в схеме. Далее нужно включить приборы, необходимые для обеспечения работы комплекса: генератор сигналов высокочастотный Г4-153, подключенный к разъему «ТЕСТ» на задней панели верхнего блока комплекса, вольтметр ВЗ – 56, и, при необходимости визуальной оценки сигнала по ходу измерения, осциллограф С1-93, подключенный к выходному разъему «ФАЗА» верхнего блока. После того как все вышеуказанные приборы и сам комплекс находятся во включенном состоянии, можно следует запускать программу измерения.

Основное меню программы, появляющееся при ее запуске, представляет собой разделенное на две части окно. В верхней части указано название программы «*Программа измерения характеристик полупроводниковых структур*», место ее разработки (Томский университет систем управления и радиоэлектроники), а также диапазоны измерения и погрешности измеряемых величин, диапазоны частот тестового сигнала и амплитуды напряжения смещения. В нижней части рабочего окна отображается основное меню программы, в котором по пункту указаны следующие процедуры: «*Калибровка С*», «*Измерение $C, G(V)$* », «*Измерение ВАХ*», «*Измерение фото-ЭДС, шума(V)*», «*Измерение фото-ЭДС(f)*», «*Запись зависимостей на диск*», «*Чтение зависимостей с диска*», «*Вывод зависимостей на монитор*». Выбор необходимой процедуры осуществляется при помощи клавиш NumLoc. Посредством клавиш «вниз» и «вверх» производится выбор процедуры из списка. Для запуска выбранной процедуры программы необходимо нажать клавишу <Enter>.

Процедура калибровки емкостей. Для того чтобы измерить вольт-фарадную характеристику полупроводниковой структуры нужно произвести калибровку емкостей.

Для входа в процедуру калибровки в основном меню программы необходимо выбрать пункт «Калибровка С». При нажатии клавиши <Enter> программа запускает процедуру калибровки емкостей. Прорисовывается окно, в верхней части которого появляется надпись «Калибровка», затем программа спрашивает «Хотите воспользоваться записанным массивом калибровок? <Y/N>». В данной процедуре уже заложен массив ранее измеренных калибровочных емкостей и, соответствующих им, калибровочных напряжений. При нажатии клавиши <Y> программа выдает на экран записанный массив, а в нижней части окна программа оповестит «Для выхода в меню нажмите <Enter>». Нажатие этой клавиши возвращает программу в основное меню.

Если оператор выбирает калибровку, необходимо нажать клавишу <N>. Затем в рабочем окне программы следует сообщение о том, что необходимо установить аттенюатор милливольтметра ВЗ – 56 в положение «300 mV» и нажать <Enter>. Это необходимо сделать, поскольку в данном режиме работы милливольтметр покрывает всю область измеряемых напряжений без ограничений. После того как аттенюатор установлен в данное положение и произведено нажатие клавиши <Enter> спрашивается «Частота тестового сигнала задается программно? <Y/N>». Если тестовый сигнал устанавливается вручную, следует нажать клавишу <N>. На экране появиться надпись «Установите необходимую частоту на генераторе Г3-112. <Enter>», после установки необходимой частоты тестового сигнала следует нажать клавишу <Enter>.

Если управление тестовым сигналом осуществляется программно, то следует нажать клавишу <Y>, после чего последует вопрос: «Стандартная частота тестового сигнала 1 МГц. Будете изменять? <Y/N>». Если на клавиатуре нажать клавишу <N> то дальнейшие измерения будут проводиться на данной частоте тестового сигнала поступающего с генератора Г4-153. Амплитуда тестового сигнала равна 1 мВ. Значение амплитуды закладывается в теле данной процедуры программы и изменение его при работе с данным комплексом не требуется.

Если же по каким-то причинам необходимо изменить значение частоты тестового сигнала, нужно нажать клавишу <Y>, после чего на экране появится следующая информация «Введите частоту тестового сигнала в кГц.». После ввода необходимого значения, и последующего нажатия клавиши <Enter> программа устанавливает выбранную частоту генератора, о чем свидетельствует мерцающая надпись в нижней части рабочего окна «Жду установления амплитуды». Затем программа выдает информацию следующего содержания «Измеряю наводку на входе CV – GV – модуля. <Enter>». При нажатии

клавиши *<Enter>* на экран выводится величина измеренного напряжения наводки. Непосредственно далее следует измерение калибровочных напряжений. В рабочем окне программы построчно выводятся калибровочные емкости и соответствующие им измеряемые напряжения. Процесс измерения сопровождается мерцающей надписью в нижней части окна «*Провожу измерение*». По окончании процесса измерения на экране высвечивается надпись «*Для выхода в меню нажмите <Enter>*».

Процедура измерения вольт-фарадных характеристик.

После того, как завершена процедура калибровки можно переходить к измерению ВФХ. Для этого в основном меню программы необходимо выбрать пункт «*Измерение $C, G(V)$* » и нажать клавишу *<Enter>*. После этого программа запустит данную процедуру. Во вновь прорисованном окне, в верхней его части во время всего измерения будет видна надпись «*Измерение $C(V), G(V)$* ». Чуть ниже данной надписи, также на протяжении всей работы с данной процедурой, выводится следующая информация «*Подключаю Z_x к измерителю*», которая свидетельствует о том, что измеряемый объект подключен к комплексу. Далее в рабочем окне содержится следующая информация «*Использую экспресс-обработку <Enter>*». Эта надпись означает, что в программе, для измерения ВФХ используется описанный в п.3.1 метод измерений.

При нажатии на клавишу *<Enter>* на экране появляется следующая информация «*Установите постоянное смещение на структуре (В) $V_0 =$* ». После ввода необходимого значения начального напряжения смещения на полевом электроде структуры нужно нажать *<Enter>*. Затем появиться надпись «*Установите амплитуду развертки на структуре (В) $V_A =$* ». Постоянное смещение на структуре – это значение напряжения, подаваемого на структуру относительно которого будет «разворачиваться» сканирующее напряжение. Амплитуда развертки – это амплитуда напряжения подаваемого на структуру. Например, если постоянное смещение задать равным 2 В, а амплитуду развертки равной 4 В, то на структуре установится напряжение $(2 + 4) = 6$ [В], и в процессе измерения напряжение на структуре будет линейно уменьшаться до величины $(2 - 4) = -2$ [В]. Если сумма или разность этих значений будет превышать по модулю 7 В, то программа выведет сообщение: «*Неправильные значения V_0, V_A* » и переместит курсор в область ввода значения постоянного смещения на структуре, и процедура ввода значений напряжения смещения и амплитуды повторится. Ограничение напряжений на уровне 7 В связано с конструктивом используемого ЦАП.

После того как численные значения будут введены правильно, программа выдаст следующую информацию «*Напряжение на структуре (В)* », и ниже этой строки, начиная со значения постоянного смещения и заканчивая значением амплитуды развертки, «пробежит» численное значение напряжения подаваемого на структуру. После того, как напряжение на структуру подано, в верхней области рабочего окна

программы появится надпись «Цикл измерения C, G » обозначающая начало измерения вольт-фарадной зависимости. Далее следует надпись «Поляризация структуры <Enter>». Для того чтобы произошла поляризация структуры необходимо выждать некоторое время (40-50 секунд) и нажать клавишу <Enter>. После этого в рабочем окне программы будет представлена следующая информация: «Выполнено %» и перед символом «%» будет выводиться числовое значение от 1 до 100, отражающее ход измерения.

Вслед за этим выводится строка « $Cx <пФ> =$ (значение измеренной емкости) $Ux <мВ> =$ (значение измеренного напряжения)». Далее следует надпись «Напряжение на структуре <V> (значение напряжения подаваемого на структуру)». Напряжение подаваемое на структуру будет «пробегать» все значения из заданного ранее диапазона с шагом, устанавливаемым программой.

В нижней области рабочего окна программы будет мерцать надпись «Провожу измерение», символизирующая данный процесс.

После того как процесс измерения завершен программа выдаст на экран значения максимальной и минимальной измеренной емкости в следующем виде: « $Cmax <пФ>$ (численное значение) $Cmin <пФ>$ (численное значение)». Нажатие клавиши <Enter> возвращает программу в основное меню.

Графическое представление измеренных зависимостей. После того, как измерение произведено, полученную зависимость необходимо представить в виде графика, для этого из основного меню программы следует выбрать пункт «Вывод зависимостей на монитор». Появится графическое окно, в котором будет построен график последней измеренной вольт-фарадной зависимости.

Сохранение и загрузка массивов данных. Для сохранения полученных массивов данных (результатов измерения) в главном меню программы следует выбрать пункт «Запись зависимостей на диск». Будет предложено присвоить сохраняемому массиву имя. После ввода имени и нажатия клавиши <Enter> программа сохранит массив в файле и разместит его в папке с основной программой. Затем появится окно основного меню программы.

Для загрузки сохраненных массивов необходимо из главного меню выбрать пункт «Чтение зависимостей с диска», набрать имя загружаемого массива и присвоить ему номер. Номер массива означает порядок представления графика в процедуре вывода зависимостей на монитор. На данный момент возможен одновременный просмотр до 7 загруженных зависимостей.

После окончания измерений, необходимо выйти из программы измерений, выключить все приборы, аналоговый модуль и персональный компьютер.

3.4. Задание к лабораторной работе

В данной работе необходимо измерить частотные и полевые зависимости емкости МДП-структур на основе кремния с электронным типом проводимости при различных значениях параметров, задающих условия измерения. Значения этих параметров следует получить в виде индивидуального задания у преподавателя. Из полученных массивов численных значений емкости от напряжения на полевом электроде необходимо вычислить все основные параметры МДП-структуры. Это достигается последовательным выполнением следующих действий.

1. Установить указанное преподавателем значение частоты тестового сигнала, произвести калибровку измерителя и снять вольт-фарадные характеристики МДП-структуры на трех различных частотах в нескольких диапазонах напряжений смещения, указанных преподавателем.
2. Сохранить на дискете полученные зависимости в виде массивов.
3. По полученным зависимостям аналитически рассчитать значения емкости диэлектрика, фиксированного заряда в диэлектрике, концентрации донорной примеси, проявляющихся на различных частотах и различных амплитудах изменяемого напряжения на структуре. Для расчетов использовать выражения (1)-(4), в которые подставляются значения емкостей, найденные из результатов измерений. Объяснить полученные результаты.
4. Составить отчет и подготовить его защиту.

Перед началом выполнения лабораторной работы студенты должны ознакомиться с теоретическим материалом по ВФХ МДП-структуры, разобраться в принципах составления метрологического комплекса для экспериментального исследования ее свойств, а также иметь четкое представление о последовательности выполняемых операций при измерении ВФХ и вычислении из них основных параметров МДП-структуры.

4. ТРЕБОВАНИЯ К СОСТАВЛЕНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

1. Отчет по лабораторной работе в обязательном порядке должен содержать следующие разделы:
 - цель лабораторной работы,
 - теоретическая часть,
 - описание экспериментальной установки,
 - конкретные данные на выполнение лабораторной работы,
 - полученные экспериментальные результаты в виде графиков полевых и частотных зависимостей фотопроводимости,
 - детальное описание расчета параметров фоторезистора из полу-

ченных зависимостей,

-обсуждение полученных результатов и их сравнение с литературными данными.

2. Отчет должен быть набран в редакторе Word и представлен в скрепленном виде. Схемы и графики выполнены в графическом редакторе и вставлены в текст отчета. Рекомендуемые параметры для набора текста: шрифт Arial – 12, поля со всех сторон по 2 см, одиночный интервал между строк.
3. В случае выполнения лабораторной работы несколькими студентами в конце отчета должно быть указано конкретное участие каждого в выполнении работы.
4. В соответствии с рейтинговой системой качество выполнения лабораторной работы и оформления отчета оценивается в баллах, которые суммируются с баллами по контрольным работам.

5. ЛИТЕРАТУРА

1. Давыдов В.Н. Твердотельная электроника. Учебное пособие. - Томск, ТМЦ ДО, 2005. – 170 с.
2. Епифанов Ю.И. Физические основы микроэлектроники. – М.: Высшая школа, 1971. – 388 с.
3. Зи С. Физика работы полупроводниковых приборов. Часть 1. Пер. с англ. под ред. В.А. Гергеля – М.: Мир. – 1984. – 455 с.
4. Шалимова К.В. Физика полупроводников. – М.: Энергия. - 1991, - 416с.