

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

**КАФЕДРА ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ**

**В.Н. Давыдов**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ШУМОВЫХ СВОЙСТВ  
ПРИБОРОВ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ**

*Учебно-методическое пособие  
к лабораторной работе*



**Томск 2010**

Министерство образования и науки Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

**КАФЕДРА ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ (ЭП)**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ШУМОВЫХ СВОЙСТВ ПРИБОРОВ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ**

Учебное - методическое пособие  
к лабораторной работе по дисциплине  
«Физические основы оптоэлектроники»

ТОМСК – 2010

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение
2. Теоретическая часть
  - 2.1. Типы и физическая природа шумов
  - 2.2. Основные параметры и характеристики шумов
  - 2.3. Полевые свойства шумов
  - 2.4. Частотные свойства шумов
3. Экспериментальная часть.  
Структурная схема экспериментальной установки
4. Программное обеспечение установки
6. Задание к лабораторной работе
7. Методические указания по выполнению работы
8. Требования к составлению и оформлению отчета
9. Литература

## **1. ВВЕДЕНИЕ**

Цель данной работы – изучение флуктуационных (шумовых) процессов, протекающих в полупроводниковом приборе путем измерения его характеристик при различных значениях прикладываемого напряжения, при различных уровнях фоновой подсветки, а также путем исследования кинетических свойств шумовых процессов.

## **2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ**

Под шумами понимают случайные изменения электрических сигналов на выходе электронного прибора, которые не связаны с входным сигналом, а вызваны случайными изменениями параметров и свойств самого прибора. Изучение шумов в приборах электронной техники представляет собой важную проблему в науке и технике, поскольку они определяют наименьшие уровни сигналов, которые могут быть обработаны электронными средствами, а также точность измерений величин электрических параметров. Чтобы определить эти уровни, необходимо уметь корректно измерять основные параметры шумов, уметь минимизировать отношения «шум – сигнал» в устройствах приема и обработки сигналов. Решение указанных вопросов невозможно без понимания природы шумов.

Физические механизмы появления шумов в полупроводниковых приборах во всех случаях связаны со случайным характером рождения-уничтожения свободных носителей заряда в активной области прибора, хаотическим движением заряженных частиц, разбросом значений его параметров, тепловыми колебаниями решетки.

Данная лабораторная работа имеет своей целью помочь студентам инженерных специальностей понять физику формирования флуктуационных (шумовых) свойств полупроводниковых приборов, освоить экспериментальные методы исследования свойств шума, а также в наглядной форме наблюдать влияние величины электрического поля, частоты измерения и мощности фоновой подсветки на шум приборов и его свойства.

## 2.1. Типы и физическая природа шумов

**Природа шумов.** Все шумы по своей физической природе имеют причиной случайный характер движения заряженных частиц в твердом теле, их случайное рождение или уничтожение, а также случайные моменты вхождения-выхода электронов и дырок. Наиболее важные для практических применений шумы в твердых телах таковы:

- тепловой шум;
- дробовой шум;
- генерационно-рекомбинационный шум;
- избыточный шум.

**Тепловой шум.** Тепловой шум создается в результате броуновского движения заряженных частиц и столкновения их с неподвижными ионами решетки твердого тела. В результате этого энергия теплового колебания решетки и энергия теплового движения электронов выравниваются. Поэтому выделяемое электронами при столкновениях джоулево тепло поддерживает температуру решетки постоянной. Однако тепловое движение заряженных частиц может рассматриваться как результат действия на длине их свободного пробега микроисточника напряжения: от одного столкновения до следующего действует один микроисточник со своими параметрами напряжения. Сколько столкновений совершает электрон на своем движении – столько микроисточников напряжения вводится в рассмотрение. Ясно, что число вводимых микроисточников огромно и потому анализировать параметры отдельного микроисточника невозможно. Значит, нужно рассматривать один источник: это некий суммарный источник, действующий на весь образец. Поэтому если на концах полупроводникового образца регистрировать переменное напряжение, которое будет представлять собой мгновенную сумму напряжений от всех микроисточников в направлении регистрации по длине кристалла, то окажется, что это суммарное напряжение изменяет случайным образом во времени свою величину, знак, фазу и частоту. Изменения параметров суммарного напряжения будут однозначно характеризовать

тепловое движение электронов в решетке, а значит, температуру полупроводника. Согласно теореме Найквиста, впервые описавшего этот тип шума, средняя амплитуда теплового шума резистора величиною  $R$ , измеренная с помощью прибора, имеющего полосу пропускания  $\Delta f$ , равна:

$$\sqrt{U_{ш\ тепл}^2} = \sqrt{4kTR \cdot \Delta f}. \quad (1)$$

На первый взгляд кажется удивительным, что в выражении (1) измеряемый уровень шума определяется параметрами измерительного прибора: полосой его пропускания. На самом деле ничего удивительного здесь нет. Тепловой шум описывается бесконечно большим числом синусоидальных источников переменного напряжения, амплитуда каждого из которых не зависит от частоты и равна

$$\sqrt{U_{ш\ тепл}^2}(f) = \sqrt{4kTR}.$$

Поэтому чем шире полоса измерительного прибора, тем больше шумовых компонент попадут в этот прибор и дадут вклад в измеренную им величину. Именно это обстоятельство отражено тем, что в выражении (1) фигурирует полоса пропускания измерительного прибора  $\Delta f$ : чем она больше, тем больше амплитуда измеряемого теплового шума.

Если рассматривается тепловой шум двухполюсника, имеющего активное и реактивное компоненты сопротивления, то тепловой шум создается только активной частью сопротивления двухполюсника  $Re\{Z\}$ , и тогда амплитуда теплового шума будет равна

$$\sqrt{U_{ш\ тепл}^2} = \sqrt{4kT Re\{Z\}}. \quad (2)$$

Если рассматриваемая цепь представляет собой последовательно соединенные активные сопротивления  $R_1, R_2, \dots, R_n$ , то полный шум такой цепи в единичной полосе частот будет иметь среднюю амплитуду,

представляющую собой результат сложения квадратов дисперсий тепловых шумов от каждого сопротивления:

$$\begin{aligned}
 \sqrt{U_{ш\text{тепл}}^2} &= \sqrt{U_{ш\ 1}^2 + U_{ш\ 2}^2 + \dots + U_{ш\ n}^2} = \\
 &= \sqrt{4kTR_1 + 4kTR_2 + \dots + 4kTR_n} = \\
 &= \sqrt{4kT(R_1 + R_2 + \dots + R_n)}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Этот же результат можно было бы получить, если сложить все последовательно соединенные шумящие сопротивления, а только потом посчитать тепловой шум полного сопротивления.

**Дробовой шум.** Дробовой шум возникает в результате случайного характера изменения числа частиц, пролетающих область их регистрации. Типичный пример появления этого вида шума: вакуумный диод, с катода которого в каждый момент времени вылетают электроны. Вследствие разброса тепловой энергии электронов в катоде, приобретаемой в результате их столкновения с решеткой материала катода, в каждый момент времени вылетает разное число электронов. В среднем же за достаточно большой промежуток времени их число постоянно и определяется температурой катода, величиной работы выхода и его материала. Другой пример источник дробового шума: протекание постоянного тока через сопротивление. Ясно, что для описания дробового шума лучше вводить случайный источник тока, а не источник напряжения, как это было сделано для теплового шума. Средняя амплитуда дробового шума, создаваемого током величиной  $I_0$  и измеренная в полосе частот измерительного прибора  $\Delta f$  определяется следующим образом:

$$\sqrt{I_{ш\ др}^2} = \sqrt{2q \cdot I_0 \cdot \Delta f},
 \tag{4}$$

где  $q$ - заряд электрона. Амплитуда напряжения полного шума в единичной полосе частот, снимаемого с активного сопротивления, по которому течет постоянный ток, определяется тепловым шумом и за счет протекания по сопротивлению дробового шумового тока:

$$\sqrt{U_{ш}^2} = \sqrt{U_{ш \text{ тепл}}^2 + R^2 \cdot I_{ш \text{ др}}^2} = \sqrt{4kTR + R^2 \cdot 2q \cdot I_0} . \quad (5)$$

**Генерационно-рекомбинационный шум.** Этот вид шума характерен только для полупроводников, где зачастую является доминирующим. Природа его проста: за счет тепловой генерации и случайной рекомбинации в каждый момент времени в зоне проводимости и (или) валентной зоне появляются неравновесные носители заряда, число которых изменяется во времени случайным образом. Так, например, в первую секунду образовалось 100 электронов и дырок; во вторую секунду установилось 120 пар, в следующую – 80 и т.д. Таким образом, в среднем в полупроводнике в каждую секунду появляется 100 электронов и дырок. Однако около этого среднего значения возможны флуктуации числа частиц – в нашем случае около 20 пар. Именно это число неравновесных электронов и дырок приведет к случайному изменению проводимости полупроводника, что при пропускании через него постоянного тока величиной  $I_0$  создаст на концах полупроводника шумовое напряжение

$$\delta U_{ГР} \approx I_0 \cdot \delta R . \quad (6)$$

## 2.2. Основные параметры и характеристики шумов

Флуктуирующие напряжения и токи являются случайными переменными, поэтому их изучение целесообразно проводить, пользуясь аппаратом теории вероятностей. Основным способом статистического описания случайной переменной  $x(t)$  является введение в рассмотрение ее среднего значения –  $\overline{x(t)}$ , которое обозначают как  $\overline{X}$ , и среднего квадрата случайной величины –  $\overline{x(t)^2}$ . Среднее значение случайной величины  $x(t)$  находится как постоянная составляющая, вокруг которой происходят знакопеременные изменения переменной случайной величины  $x(t)$  (см. рис.1). Дисперсия случайного процесса  $x(t)$  в общем случае вычисляется вычитанием из каждого значения случайного процесса его среднего значения, возведения полученного



результата в квадрат и усреднения полученной величины по времени –  $\overline{(x(t) - \bar{X})^2}$ . Рисунок 2 иллюстрирует сказанное. Как можно видеть, дисперсия представляет собой квадрат средней амплитуды отклонения случайного процесса от своего среднего значения. Проще говоря, дисперсия – это усредненный по времени квадрат амплитуды случайного процесса.

Часто  $\bar{X}$  равно нулю, и тогда наиболее значимой величиной становится  $\overline{x(t)^2}$ . Таким образом, по аналогии с напряжением в электронном устройстве, где есть постоянное и переменное напряжение, например, на аноде лампы и потому полное напряжение представляет собой их сумму, случайный процесс также представляют как сумму среднего значения шума и квадратного корня из его дисперсии.

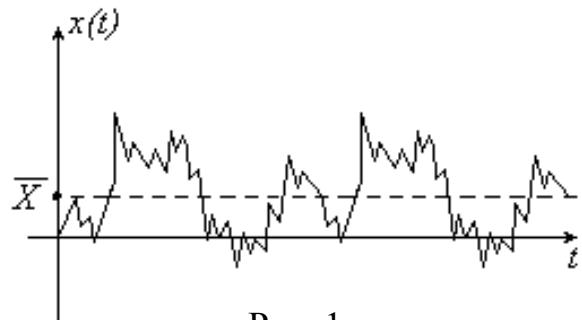


Рис. 1

**Автокорреляционная функция.** В стационарных случайных процессах важным параметром является среднее значение произведения двух значений случайного процесса, сдвинутых по времени на промежуток  $s$ :  $\overline{X(t) \cdot X(t+s)}$ . Оно называется **автокорреляционной функцией** и является мерой продолжительности влияния значения случайной переменной в данный момент времени на последующие ее значения, т.е. описывает влияние настоящего случайного процесса на его будущее.

Если  $\overline{X(t) \cdot X(t+s)} = A\delta(s)$ , т.е. является  $\delta$ -функцией параметра запаздывания  $s$ , то шум называют белым.

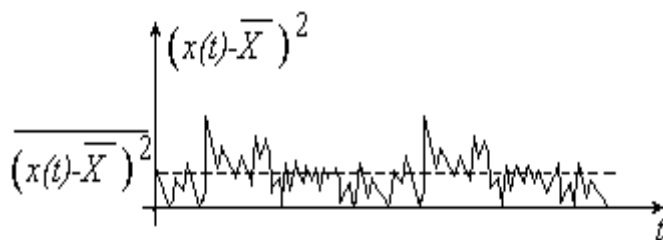


Рис.2

### 2.3. Полевые и фоновые свойства шумов в полупроводниках

Для выяснения зависимости величины регистрируемого шума полупроводникового прибора от значения постоянного напряжения на нем и

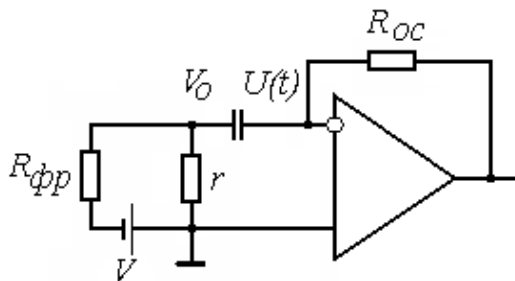


Рис.3

наличии фоновой подсветки полупроводникового прибора мощностью  $P_{\phi}$  рассмотрим входную цепь регистрирующего тракта установки (см. рис.3). Здесь обозначено:  $R_{\phi p}$  - сопротивление полупроводникового прибора (фоторезистора, фотодиода),  $r$  - сопротивление нагрузки,  $V$  - напряжение

смещения. В результате протекания постоянного тока на сопротивлении нагрузки падает постоянное напряжение  $V_0$ , которое зависит от  $V$  и сопротивлений фоторезистора и нагрузки:

$$V_0 = r \cdot j = V \frac{r}{R_{\phi p} + r}.$$

Если сопротивление фоторезистора изменяется, например, за счет тепловых флуктуаций или фоновой засветки:  $R_{\phi p} = R_{\phi p}^0 + \delta R(t, P_{\phi})$ , то на входе усилителя появится напряжение

$$U(t, P_{\phi}) = V \frac{r}{R_{\phi p}^0 + \delta R + r} = V \left( \frac{r}{R_{\phi p}^0 + r} \right) \frac{1}{1 + \delta R / (R_{\phi p}^0 + r)},$$

переменная составляющая которого будет равна

$$U(t, P_{\phi}) \approx V \left( \frac{r}{R_{\phi p}^0 + r} \right) \frac{\delta R(t, P_{\phi})}{R_{\phi p}^0 + r}. \quad (7)$$

Отсюда найдем шумовую компоненту как корень из дисперсии флуктуации:

$$U_{ш}(V, P_{\phi}) = \sqrt{U(t, P_{\phi})^2} \approx V \left( \frac{r}{R_{\phi\phi}^0 + r} \right) \sqrt{R(t, P_{\phi})^2} \quad (8)$$

Выражение (8) показывает, что при приложении к полупроводниковому прибору постоянного напряжения величина шумового напряжения на входе устройства регистрации растет по линейному закону с увеличением  $V$ . Более того, из полученного выражения также следует, что увеличение мощности фоновой подсветки, увеличивая число свободных носителей, в соответствии с законом больших чисел должно снижать уровень шума по закону  $P_{\phi}^{1/2}$ .

### 2.3. Частотные свойства шумов различной природы

Одним из эффективных методов анализа случайных величин является метод Фурье. Он основан на введении в рассмотрение спектральных плотностей случайного процесса –  $S_V(f)$ . С помощью этой величины флуктуационную эдс  $V(t)$  в узком интервале частот можно представить в виде источника синусоидальной с величиной шумового эдс  $\sqrt{S_V(f)\Delta f}$ . Достоинство такого подхода состоит в том, что с введением спектральной плотности для анализа шумов можно пользоваться теорией цепей переменного тока. Например, можно ввести шумовые генераторы тока и напряжения.

Важной теоремой спектрального анализа случайной величины является теорема Винера-Хинчина. Она показывает, как вычислить спектральную плотность любого случайного процесса.

Пусть  $x(t)$  является стационарным случайным процессом. Разложим  $x(t)$  в ряд Фурье в интервале времени  $0 \leq t \leq T$ , в пределах которого анализируется данный случайный процесс:

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n \cdot \exp(j\omega_n t),$$

где  $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ , а  $\omega_n = \frac{2\pi n}{T}$  и

$$a_n = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T X(t) \cdot \exp(-j\omega_n t) dt.$$

Спектральная плотность  $S_X(f)$  случайного процесса  $x(t)$  определяется следующим образом:

$$S_X(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \overline{a_n a_n^*},$$

где знаком (\*) отмечена комплексно-сопряженная величина. Тогда в соответствии с теоремой Винера-Хинчина спектральная плотность может быть найдена с помощью следующего выражения:

$$S_X(f) = 2 \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \overline{X(t) \cdot X(t+\tau)} \cdot \cos \omega \tau d\tau.$$

При вычислениях обычно сначала находят автокорреляционную функцию, а потом определяют спектральную плотность  $S_X(f)$ . При измерениях поступают наоборот: сначала измеряют  $S_X(f)$ , а затем находят автокорреляционную функцию. Если временной сдвиг  $\tau$  равен нулю, то можно найти:

$$\overline{x^2(t)} = \int_0^{\infty} S_X(f) df, \quad (9)$$

**Данное выражение указывает способ экспериментального определения дисперсии случайной величины.** Оказывается, что дисперсию можно определить путем интегрирования спектральной плотности случайного процесса  $S_X(f)$ .

Как можно экспериментально измерить спектральную плотность шума? Оказывается очень просто. Вспомним выражение для определения дисперсии:  $\overline{x^2(t)} = \overline{(x - \bar{x})^2}$ . Как следует из этого выражения, для вычисления дисперсии сначала надо из полного случайного процесса вычесть его среднее значение. На практике это делается установкой на входе измерителя дисперсии

разделительного конденсатора – именно он выделяет из полного шумового напряжения  $x(t)$  переменное напряжение, отделяя его от постоянного  $\bar{X}$ . Далее надо возвести в квадрат полученное знакопеременное шумовое напряжение. В результате этой операции оно станет однополярным пульсирующим с удвоенной частотой изменения во времени и будет содержать постоянное напряжение. Поясним это на примере синусоидального напряжения: в квадрате оно имеет вид

$$\cos^2 x = \frac{1 + \cos 2x}{2}. \quad (10)$$

Такую операцию выполняет известный в радиотехнике квадратичный детектор, представляющий собой мост Уистона, составленный из четырех диодов. Такие мостики стоят в любом выпрямителе сетевого напряжения. Итак, оказывается еще одну операцию по вычислению дисперсии можно легко реализовать известными радиотехническими средствами. Добавим, что диодный мостик еще извлекает квадратный корень и потому его результат дает амплитуду продетектированного напряжения, а не его квадрат. Осталась операция усреднения во времени, которая реализуется установкой конденсатора на выходе диодного мостика. Что получим на выходе? Усреднение правой части выражения (10) с учетом извлечения корня даст константу  $1/\sqrt{2}$ , которая, будучи умноженной на амплитуду входного сигнала, определит эффективную амплитуду выпрямленного напряжения, а в применении к измерению шумов определит эффективную величину дисперсии.

Что получилось в итоге? Оказалось, что корень из дисперсии случайного процесса можно измерить, если подать исследуемый шум через конденсатор на обычный квадратичный детектор, нагруженный на фильтр низких частот (ФНЧ). Такие устройства являются стандартными в любом измерителе напряжения – вольтметре. Единственное отличие, которое должно быть учтено в вольтметрах для измерения шума так это то, что исследуемые шумовые величины обычно имеют очень малую величину: до единиц нановольт. Значит,

для изучения шума необходимы **нанольтметры** с квадратичными детекторами и ФНЧ на выходе.

Для изучения природы исследуемого шума весьма полезны частотные свойства шума: зависимость шумового напряжения (дисперсии случайного процесса) от частоты измерения. По виду этой зависимости можно определить тип доминирующего шума: тепловой и дробовой шум имеют независимую от частоты измерений дисперсию, генерационно-рекомбинационный шум имеет спектральную зависимость в виде «полочки» (постоянное значение на низких частотах и падающий участок на высоких частотах), избыточный шум имеет падающую степенную зависимость дисперсии от частоты. Для измерения частотного состава исследуемого шумового напряжения разработаны и широко применяются так называемые **селективные нанольтметры**. Они представляют собой вольтметры, способные регистрировать напряжения до единиц нановольта -  $10^{-9}$  В и имеющие очень узкую, но перестраиваемую оператором, полосу пропускания. Последнее достигается установкой на входе нанольтметра перестраиваемого полосового фильтра. С помощью такого прибора удастся проанализировать зависимость амплитуды шума, измеренной в полосе измерительного прибора равной 1 Гц, от частоты его измерения. Такая зависимость называется **спектральной плотностью шума**. С точки зрения физической интерпретации спектральной плотности шума (и не только шума, но и детерминированного сигнала) поведение шума во всей полосе исследованных частот можно объяснить, предположив, что он создается множеством источников синусоидального переменного напряжения. Амплитуда каждого источника, действующего на строго заданной частоте, равна спектральной плотности шума.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

#### Структурная схема экспериментальной установки

Экспериментальная установка для измерения параметров полупроводниковых приборов представляет собой автоматизированный комплекс, предназначенный для измерения электрофизических, фотоэлектрических и шумовых характеристик полупроводниковых приборов, проводимого по программе измерений, записанной в память персонального компьютера. Результаты измерений могут предварительно обрабатываться, а также отображаться на экране монитора компьютера. Внешний вид установки показан на рис. 4.

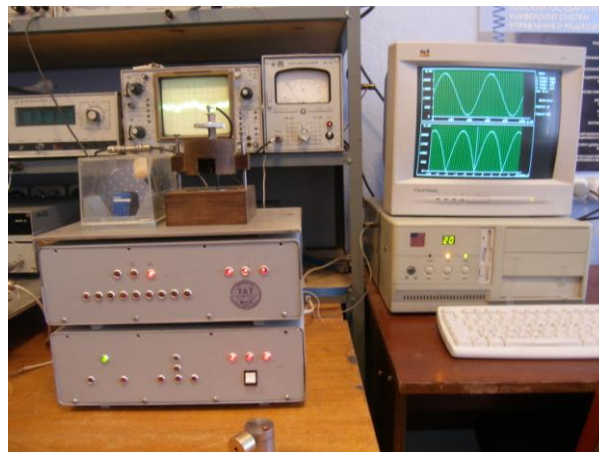


Рис.4

Данный комплекс состоит из персонального компьютера, цифрового и аналогового блоков. Компьютер предназначен для управления работой комплекса, обработки, отображения и хранения результатов измерений. Цифровой блок по командам, выдаваемым центральным процессором (PC) в соответствии с программой управления измерениями. Он представляет собой несколько специально разработанных цифровых устройств, собранных на отдельных платах размещенных в системном блоке PC и подключенных к ISA-шине компьютера. В состав этого блока входят аналого-цифровой преобразователь (АЦП), цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) и 16-ти разрядные входной и выходной регистры.

Аналоговый блок предназначен для подключения исследуемого полупроводникового прибора к измерительным модулям и выработки ими информационных сигналов, содержащих сведения об исследуемых параметрах и свойствах прибора. Аналоговый блок реализован в двухкорпусном варианте

(на переднем плане рис. 4). Верхний корпус предназначен для измерения вольт-фарадных характеристик и в данной лабораторной работе не используется. Нижний корпус содержит два приборных модуля: измеритель вольтамперных характеристик (ВАХ) и измеритель шумовых и фотоэлектрических характеристик. Структурная схема подключения этих модулей для измерения выше перечисленных характеристик изображена на рисунке 5. Выбор различных режимов работы установки осуществляется посредством переключения реле  $P_1 \dots P_9$ . Управление этими реле осуществляется программно. Каждому реле соответствует свой бит в слове состояния выходного регистра. Логическая единица (+5 В), записанная в нулевом, первом или втором бите двоичного слова выходного регистра из цифрового блока, приводит к включению реле  $P_5$ ,  $P_6$  или  $P_7$  соответственно, которые в зависимости от величины измеряемого тока подключают к схеме измерения одно из эталонных сопротивлений на входе измерителя ВАХ. Изменение полярности выходного напряжения осуществляется с помощью реле  $P_9$ , работой которого управляет третий бит. При подаче логической единицы, то сигнал на вход АЦП поступает неинвертированный сигнал.

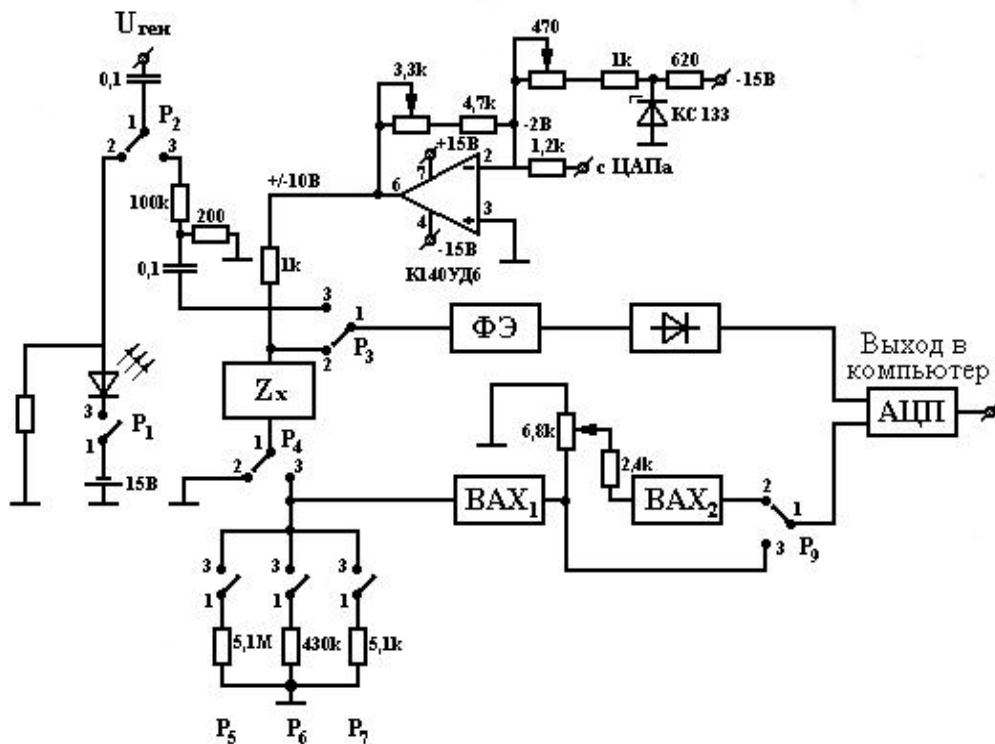


Рис. 5. Структурная схема экспериментальной установки



Переключение между режимами измерения ВАХ или фотоэлектрических (шумовых) характеристик происходит посредством реле  $P_4$ , которому соответствует четвертый бит в двоичном слове выходного регистра. Если в него записывается логическая единица (+5 В), то реле коммутирует режим измерения ВАХ, а если записывается логический ноль (0 В) то происходит переключение на режим измерения «ФЭ-шум». Реле  $P_2$  и  $P_3$  управляются пятым битом и коммутируют одновременно. Бит 6 соответствует реле  $P_1$ , которое необходимо для включения или выключения светодиода, необходимого для измерений фотоэлектрических характеристик.

Для подачи постоянного напряжения смещения на исследуемый полупроводниковый прибор используется напряжение с ЦАП, которое поступает на инверсионный вход операционного усилителя К140УД6 с коэффициентом усиления  $G = 5$ , усиливается, а затем (в зависимости от выбранного режима измерений) используется либо для снятия ВАХ, либо фотоэлектрических и шумовых.

#### **4. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТАНОВКИ**

Управление измерениями электрофизических, фотоэлектрических и шумовых характеристик полупроводниковых приборов с помощью автоматизированного комплекса осуществляется посредством программы, написанной на языке программирования Turbo Pascal «МЕТРОНОМ 02».

Программа позволяет измерять следующие характеристики:

- зависимости фотоэдс, а также шумового напряжения измеряемого полупроводникового прибора от напряжения смещения на любой частоте;
- частотной зависимости фотоэдс;
- вольтамперной характеристики (ВАХ) полупроводниковых структур.

Работа с программой облегчена тем, что в ней сформировано меню, позволяющее производить отдельные измерения независимо от других, записывать результаты измерений на винчестер, а также выводить зависимости

в виде графиков на экран монитора. Вся информация по работе с автоматизированным комплексом заложена в программу, по мере выполнения которой необходимые оператору сообщения выводятся на экран монитора. Эти сообщения позволяют не только правильно выбирать условия измерения объекта, но и следить за ходом выполнения программы.

## **6. ЗАДАНИЕ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ**

В данной работе необходимо измерить полевые и частотные зависимости полупроводникового фотодиода на основе кремния при различных значениях параметров, задающих условия измерения. Значения этих параметров следует получить в виде индивидуального задания у преподавателя. Из полученных массивов численных значений шума от напряжения на фотодиоде необходимо вычислить все его основные параметры. Это достигается последовательным выполнением следующих действий.

1. Установить указанное преподавателем значение напряжения сканирования, произвести проверку работы измерителя ВАХ и снять вольтамперную характеристику полупроводникового прибора, выданного преподавателем для выполнения лабораторной работы в темноте и в условиях фоновой подсветки. Определить тип прибора: фотодиод или фоторезистор.

2. Сохранить на дискете измеренные ВАХ в виде массивов.

3. По полученной зависимости рассчитать сопротивление фоторезистора или обратный ток фотодиода. Рассчитать дифференциальное сопротивление фотодиода для нескольких напряжений. Объяснить полученные результаты.

4. Измерить полевые зависимости шумового напряжения полупроводникового прибора на нескольких частотах и фоновых засветках, указанных преподавателем. Объяснить полученные результаты.

5. Измерить частотные зависимости шумового напряжения полупроводникового прибора при нескольких напряжениях и фоновых засветках, указанных преподавателем. Объяснить полученные результаты.

4. Составить отчет и подготовить его защиту.

Перед началом выполнения лабораторной работы студенты должны ознакомиться с теоретическим материалом по ВАХ и шумовым характеристикам полупроводниковых приборов, разобраться в принципах организации и работы автоматизированного комплекса, а также иметь четкое представление о последовательности выполняемых операций при измерении требуемых характеристик.

## **7. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ**

**Подготовка к работе.** В данном параграфе описана работа с программой измерения электрических характеристик полупроводниковых приборов. Перед началом измерений необходимо подключить исследуемый полупроводниковый прибор (фотодиод или фоторезистор) ко входным байонетным разъемам аналогового блока. Указанные разъемы находятся на задней панели аналогового блока.

Перед началом измерений необходимо включить все приборы комплекса и дать примерно 20-30 минут на прогрев приборов и модулей. Первым включают РС, а затем аналоговый блок комплекса. Для этого нужно переключить сетевой тумблер на передней панели аналогового блока в положение «Включено». При включении аналогового блока на передних панелях обоих корпусов в правой части должны загореться три индикаторных светодиода, указывающие на наличие напряжений плюс/минус 15В и плюс 5В. Далее необходимо включить приборы, входящие в состав комплекса: программируемый генератор сигналов Г4-153, подключенный к разъему «ТЕСТ» на задней панели аналогового блока, вольтметр ВЗ – 56, и, при необходимости визуальной оценки сигнала по ходу измерения, осциллограф,

подключенный к выходному разъему «ФАЗА». Данный разъем также находится на задней панели аналогового блока

После того как все вышеуказанные приборы и двухблочный измеритель параметров полупроводниковых приборов находятся во включенном состоянии, можно запускать программу измерения. Ярлык программы «МЕТРОНОМ 02» находится на рабочем столе РС.

Основное меню программы, появляющееся при ее запуске, представляет собой разделенное на две области окно. В верхней области 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 области рабочего окна, непосредственно, сформировано основное меню программы, в котором по пунктам указаны следующие процедуры: «Калибровка С», «Измерение С, G(V)», «Измерение ВАХ», «Измерение фотоэдс, шума(V)», «Измерение фотоэдс (f)», «Запись зависимостей на диск», «Чтение зависимостей с диска», «Вывод зависимостей на монитор». Выбор необходимой процедуры осуществляется при помощи клавиатуры. Посредством клавиш NumLock «↑» и «↓» производится выбор процедуры из списка, затем необходимо нажать клавишу <Enter>.

**Процедура измерения ВАХ.** Для входа в процедуру измерения вольтамперной характеристики следует в основном меню программы выбрать пункт «Измерение ВАХ» и нажать клавишу <Enter>.

Программа формирует окно, в верхней строке которого на протяжении всей работы с выбранной процедурой будет видна надпись «Измерение ВАХ». Далее следует информация «Подключаю Zx к измерителю ВАХ», которая свидетельствует о том, что измеряемый объект подключен к комплексу. Затем программа измерит начальные состояния блока при нулевом напряжении на структуре, при различных режимах работы измерителя (подключении различных эталонных сопротивлений и изменении полярности измерителя (см.

4.5.1)). Этот процесс будет отражен в виде появляющихся по ходу измерения строк «U1 <+> = (численное значение измеренного напряжения)», «U1 <-> = (численное значение измеренного напряжения)» и т.д. В нижней области окна будет видна надпись «Начальные состояния ОУ ВАХ».

После этого программа просит ввести значение напряжения смещения и амплитуды развертки. Действовать нужно аналогично приведенному выше описанию. После ввода данных значений, на структуре установится выбранное напряжение (этот процесс, также аналогичен описанному выше), в верхней части окна появится надпись «Цикл измерения ВАХ» и «Поляризация структуры <Enter>». Нажатие клавиши <Enter> приведет к началу процесса измерения ВАХ. Рабочее окно программы будет иметь следующий вид:

«Выполнено \_\_\_ %», перед символом «%» будет выдаваться числовое значение от 1 до 100 отражающее ход измерения;

Вслед за этим идет строка «Uizm = (значение измеренного напряжения)»;

Далее следует надпись «Напряжение на структуре <В> (значение напряжения подаваемого на структуру)». Напряжение, подаваемое на исследуемый прибор, будет «пробегать» все значения из заданного ранее диапазона с шагом устанавливаемым программой;

В нижней области рабочего окна программы будет видна следующая информация «Iut <мкА> = (численное значение измеренного тока)», ниже этой строки «Диапазон (номер эталонного сопротивления подключенного к схеме) Полярность (<+> или <->, в зависимости от того какова полярность измерителя - положительная или отрицательная)».

По завершению процесса измерения программа выведет на экран максимальное и минимальное значения измеренных напряжения и тока. Для выхода в основное меню необходимо нажать клавишу <Enter>.

**Процедура измерения фотоэдс, шума от напряжения.** Для входа в процедуру измерения фотоэдс, шума от напряжения следует в основном меню программы выбрать пункт «Измерение фотоэдс, шума (V)» и нажать клавишу <Enter>. Программа сформирует окно, в верхней строке которого на

протяжении всей работы с выбранной процедурой будет видна надпись «Измерение ФЭ(V), Шум(V)».

Далее программа измерит и выдаст значение напряжения соответствующее начальному состоянию измерителя, когда на приборе нет напряжения и он не освещается. Этот процесс на экране будет представлен в виде «U<sub>ph</sub><mV> = (численное значение измеренного напряжения)». Затем последует информация «Введите частоту модуляции излучения в кГц». Необходимо ввести значение частоты, на которой будет работать светодиод облучающий структуру. После ввода выбранного значения частоты модуляции следует нажать клавишу <Enter>. После этого программа выдаст информацию следующего содержания «Включите тумблер СВЕТОДИОД вверх <Enter>». Сделав это, следует нажать клавишу <Enter>. После того в верхней части окна, мигая, появится строка «Работает светодиод на 0.91 мкм». Данное число есть длина волны излучения, испускаемого светодиодом.

Далее идет процедура ввода значения напряжения, подаваемого на прибор, которая описана в описании работы с процедурой измерения фотоэдс или шума полупроводникового прибора.

После ввода необходимых значений напряжений и установки напряжения на структуре в верхней части окна будет видна надпись «Цикл измерения ФЭ и Шума», обозначающая данный процесс. Далее следует надпись «Выполнено %», перед символом «%» будет выдаваться числовое значение от 1 до 100 отражающее ход измерения. Затем следует надпись «Напряжение на структуре <В> (значение напряжения подаваемого на структуру)». Напряжение, подаваемое на исследуемый прибор, будет «пробегать» все значения из заданного ранее диапазона с шагом устанавливаемым программой. Ниже этой строки следует другая надпись «ФЭ = (численное значение измеренного напряжения при освещении структуры) ШУМ = (численное значение напряжения измеренного при отсутствии освещения)». В процедуре при выполнении измерения происходит процесс включения/выключения светодиода, что позволяет одновременно снимать как фотоэлектрическую, так

и шумовую характеристики. При этом в программе заложена процедура задержки, за счет которой структура успевает перенастроиться под каждый из режимов измерения, что не приведет к искажению полученных результатов. Данный процесс отражается в виде мигающей надписи «Жду установления амплитуды» в нижней области рабочего окна. По завершению измерения программа выдает на экран значения максимальных и минимальных измеренных напряжений (в милливольтках) для каждого вида измерений. Для выхода в основное меню необходимо нажать клавишу <Enter>.

**Процедура измерения фотоэдс от частоты.** Для входа в процедуру измерения фотоэдс от частоты следует в основном меню программы выбрать пункт «Измерение фотоэдс (f)» и нажать клавишу <Enter>.

Программа сформирует окно, в верхней строке которого на протяжении всей работы с выбранной процедурой будет видна надпись «Измерение ФЭ».

Далее идет процедура ввода значения напряжения подаваемого на структуру. В рабочем окне программы появится надпись «Установите постоянное смещение на структуре (В)  $V_0 =$  ». В данном случае напряжение смещения – это постоянное напряжение, которое в процессе измерения будет выставлено на структуре. После ввода необходимого значения нужно нажать <Enter>. Программа установит заданное напряжение, после чего на экране появится надпись «Диапазон частот 10 Hz – 100 kHz». Это означает, что в процессе измерения частота, на которой проводится измерения, будет изменяться от 10 Гц до 100 кГц.

Следом за этой информацией последует другая информация: «Цикл измерения  $K_{ус}(f)$ ». Это означает, что далее будет проводиться измерение коэффициента усиления усилителя в зависимости от частоты. Данное измерение необходимо провести для того, чтобы в последующей процедуре измерения фотоэдс от частоты учесть возможную неравномерность частотной характеристики усилителя  $K_{ус}(f)$ . После того как будет нажата клавиша <Enter>, начнется процесс измерения  $K_{ус}(f)$ . На экран будут выводиться следующие значения « $f$  <Hz> = (численное значение частоты)  $K_{ус}(f) =$

(численное значение измеряемого коэффициента усиления)» После завершения процесса измерения коэффициента усиления в зависимости от частоты, непосредственно, последует процесс измерения фотоэдс от частоты в уже указанном диапазоне частот и при уже установленном выше значении напряжения на структуре. Этот процесс будет отражен на экране в виде надписи «Цикл измерения ФЭ(f)» и последующем выводе подаваемой частоты и измеренной фотоэдс в виде «f <Hz> = (численное значение частоты) ФЭ <мВ> = (численное значение измеряемого напряжения)». По завершении работы процедуры на экран выводятся максимальное и минимальное значение фотоэдс. Для выхода в основное меню необходимо нажать клавишу <Enter>.

**Процедура измерения шума от частоты** Измерение частотных зависимостей шумового напряжения полупроводникового прибора производится с помощью селективного нановольтметра «Unipan 237», который устанавливается между АЦП и выходом измерителя «ФЭ-шум» вместо вольтметра ВЗ-56. Нановольтметр устанавливается в режим узкой полосы нажатием клавиши «40 дБ», а постоянное напряжение на АЦП снимается с клемм «Output» прибора. Генератор тестового сигнала выключается, постоянное напряжение со светодиода снимается. Фоновая подсветка создается с помощью светодиода, расположенного в непосредственной близости от исследуемого полупроводникового прибора. Уровень фоновой подсветки задается вручную с помощью регулируемого источника постоянного напряжения. Изменение частоты измеряемого шума производится оператором вручную по командам, записанным в программу управления и выдаваемым программой на монитор в требуемом месте.

**Процедура записи зависимостей на диск.** После того, как было произведено какое-либо измерение, результаты которого необходимо сохранить, можно воспользоваться процедурой записи зависимостей на диск. Для этого в основном меню нужно выбрать процедуру с одноименным названием и нажать клавишу <Enter>. После этого программа попросит ввести имя файла. Имя файла должно содержать только стандартные символы для



наименования файлов. После того как имя введено, нужно нажать клавишу <Enter>. Файл с массивами измеренных значений будет записан в директорию, в которой находится программа, и произойдет возврат в основное меню.

**Процедура чтения зависимостей с диска.** Если в наличии имеется файл с записанными с него уже измеренными данными, то можно воспользоваться процедурой чтения зависимостей с диска. Для этого в основном меню нужно выбрать процедуру с одноименным названием и нажать клавишу <Enter>. Программа попросит ввести номер массива. Это требуется для того, чтобы можно было считать две или более зависимостей, каждой из которых будет соответствовать своя процедура вывода результатов на график. После того, как номер массива введен, необходимо ввести имя файла, если файла с указанным именем с данной директории нет, то программа выдаст сообщение: «Имя файла указано не верно <Enter>». После этого нужно повторить попытку, пока не будет введено верное имя. После этого файл будет считан и программа осуществит возврат в основное меню.

**Процедура вывода зависимостей на монитор.** Для вывода измеренной зависимости на экран монитора необходимо в основном меню выбрать процедуру «Вывод зависимостей на монитор» и нажать клавишу <Enter>. На экране появится сетка и, в зависимости от того какая характеристика была измерена, произойдет маркировка осей, а внутри сетки будет прорисован график или графики. Для выхода в основное меню необходимо нажать <Enter>.

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

## **8. 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 по полученным зависимостям,
  - обсуждение полученных результатов и их сравнение с расчетными 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 работе.
  4. В соответствии с рейтинговой системой качество выполнения лабораторной работы и оформления отчета оценивается в баллах, которые суммируются с баллами по контрольным работам.

## **9. ЛИТЕРАТУРА**

1. Давыдов В.Н. Физические основы оптоэлектроники. Учебное пособие. - Томск, ТМЦ ДО, 2003. – 135 с.
2. Давыдов В.Н. Физические основы оптоэлектроники. Учебно-методическое пособие. - Томск, ТМЦ ДО, 2004. – 99 с.
3. Бендат М. Измерение и анализ случайных процессов. - М., Мир, 1974. – 485с.