

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

В.Н. Давыдов

**ИССЛЕДОВАНИЕ ШУМОВЫХ СВОЙСТВ
ПРИБОРОВ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ**

Методические указания
по выполнению лабораторной работы

Томск
2022

УДК 621.383(075.8)
ББК 22.343+22.345
Д-138

Рецензент:

Троян П.Е., профессор кафедры «Физическая электроника»
Томского государственного университета систем управления
и радиоэлектроники, д-р тех. наук

Давыдов, Валерий Николаевич

Д-138 Методические указания по выполнению лабораторной работы «Исследование шумовых свойств приборов оптоэлектроники»: учебно-методическое пособие. / В.Н. Давыдов – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022. - 17 с.

Данное учебно-методическое пособие является неотъемлемой частью комплекта учебно-методического комплекса для изучения дисциплин, связанным с изучением приборов оптоэлектроники, фотоники и т.п. Оно содержит теорию и методику исследования шумов в приборах оптоэлектроники.

В пособии приведено краткое изложение теории шумов, касающееся шумов в полупроводниках. Приведены аналитические выражения для нахождения среднего значения и дисперсии шума, а также выражения, описывающие полевые и частотные свойства шумов. Описана экспериментальная установка для исследования шумов и даны пояснения к принципу измерения ею малых сигналов шума. Изложена методология измерений шумов и методы обработки результатов измерений.

Печатается по решению научно-методического совета,
протокол № 31-08/22 от 01.09.2022

УДК 621.383(075.8)
ББК 22.343+22.345

© Давыдов В.Н., 2022
© Том. гос. ун-т систем упр.
и радиоэлектроники, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

1 ВВЕДЕНИЕ	4
2 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	4
2.1 Типы и физическая природа шумов.....	4
2.2 Основные параметры и характеристики шумов	8
2.3 Полевые свойства шумов.....	9
2.4 Частотные свойства шумов.....	10
3 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	13
4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	13
4.1 Структурная схема экспериментальной установки	13
4.2 Конструкция и электрическая схема модуля исследуемых приборов.....	14
5 ЗАДАНИЕ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ	15
4.3 Измерение частотных зависимостей шума.....	15
5.2 Измерение полевых зависимостей шума.....	16
6 ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА.....	16
7 РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.....	17

1 ВВЕДЕНИЕ

Цель данной работы – изучение шумовых процессов, протекающих в полупроводниковом приборе путем измерения его характеристик при различных значениях прикладываемого напряжения, 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 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 прибора.

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 проявляется как наличие на торцах полупроводникового образца, находящегося при температуре отличной от абсолютного нуля, знакопеременного напряжения. Его амплитуда, частота и

начальная фаза меняются со временем случайным образом. Причиной появления теплового шума является броуновское движение свободных электронов (дырок) в полупроводнике и их столкновения с решеткой.

Для того чтобы понять физический механизм появления электрического напряжения на торцах полупроводника, характеризующего величину теплового шума, будем рассматривать полупроводник как совокупность двух взаимодействующих через соударения подсистем: ионную и электронную.

Тепловое движение заряженных частиц, например, k -того электрона, можно рассматривать как хаотический микроток величиной j_k (напомним, что ток – это направленное движение заряда). Протяженность этого микротока равна длине свободного пробега электрона. После его столкновения с решеткой направление движения и скорость электрона меняются случайным образом. Соударение, как это интерпретирует электродинамика, есть проявление сопротивления микроток, которое обозначим как R_k . Есть ток, есть сопротивление. Тогда согласно закону Ома можно говорить о наличии в объеме полупроводника на длине свободного пробега случайного источника микронапряжения величиной $U_k = j_k R_k$. Ясно, что от одного столкновения до следующего действует один микроисточник со своими параметрами напряжения, после столкновения – другой и т.д. Сколько столкновений совершает электрон при своем движении за время его наблюдения – столько микроисточников напряжения вводится в рассмотрение. Ясно, что число вводимых микроисточников огромно и потому анализировать параметры отдельного микроисточника невозможно. У каждого микроисточника напряжения будет своя амплитуда, свой знак, своя ориентация в пространстве и т.д. Значит, можно рассматривать один источник: это некий источник переменного напряжения, полученный суммированием всех микроисточников от всех электронов в направлении регистрации. 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 величиной R , измеренная с помощью прибора, имеющего полосу пропускания Δf , равна:

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

На первый взгляд кажется удивительным, что в выражении (1) измеряемый уровень шума определяется параметром измерительного прибора: полосой его пропускания. На самом деле ничего удивительного здесь нет. Тепловой шум

описывается бесконечным числом синусоидальных источников переменного напряжения, амплитуда каждого из которых не зависит от частоты и равна

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

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

Если рассматривается тепловой шум двухполюсника, имеющего активное и реактивное компоненты импеданса, то тепловой шум будет создаваться только активной частью сопротивления двухполюсника $\text{Re}(Z)$, и тогда величина теплового шума в единичной полосе частот будет равна

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

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:

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

Этот же результат можно 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 из его материала. Другой пример источник дробового шума - протекание постоянного тока через сопротивление.

Для описания дробового шума лучше вводить случайный источник тока, а не напряжения, как это сделано для теплового шума. Средняя амплитуда дробового шума, создаваемого током величиной I_0 и измеренная в полосе частот измерительного прибора Δf , определяется следующим образом:

$$\sqrt{I_{ш \partial p}^2} = \sqrt{2q \cdot I_0 \cdot \Delta f}, \quad (4)$$

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 шумом за счет протекания по сопротивлению тока I_0 :

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

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

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

Избыточный шум. В общем случае данный вид шума включает все виды шумов, превышающие указанные ранее шумы. Это контактные шумы, возникающие при токопротекании через контакты к полупроводнику, шумы за счет микропробоев в активной области прибора, захват и выброс носителей с состояний на поверхности полупроводникового образца. В современных приборах оптоэлектроники из перечисленных компонент избыточного шума последний вид шума является доминирующим. Его отличительной особенностью является зависимость величины шума от частоты измерения, которая описывается зависимостью

$$\overline{i_{ш.изб}^2} = A \frac{I^2}{f^\alpha}.$$

Величина шума определяется константой A , зависящей от технологии изготовления прибора, величиной тока, протекающего через прибор I , а также показателем степени α также определяемой технологией и топологией прибора. Указанная зависимость представляет собой убывающую кривую, показывающую большой шум на низких частотах и малый на высоких с плавным переходом от больших значений к малым.

Ввиду того, что этот вид шума имеет технологическую природу он трудно рассчитываемый и потому исследуется экспериментально. основной способ его снижения на практике – это повышение рабочих частот прибора.

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 –

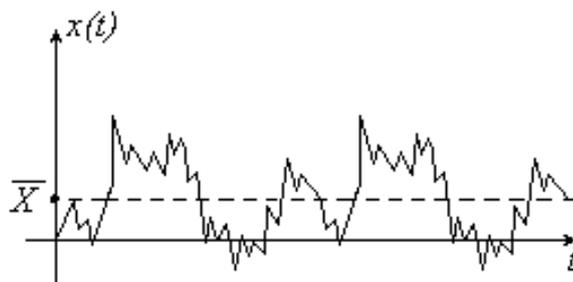


Рисунок 1 – Исследуемый случайный процесс и его среднее значение

$\overline{x(t)^2}$. Среднее значение случайной величины $x(t)$ находится как постоянная составляющая, вокруг которой происходят знакопеременные изменения случайной величины $x(t)$ (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 – $\overline{(x(t) - \overline{X})^2}$. Рисунок 2 иллюстрирует сказанное. Как можно видеть, дисперсия шума представляет собой квадрат средней амплитуды отклонения случайного процесса от своего среднего значения. Проще говоря, дисперсия – это усредненный по времени квадрат амплитуды случайного процесса.

Часто \overline{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 представляет сумму среднего значения шума и квадратного корня из его дисперсии.

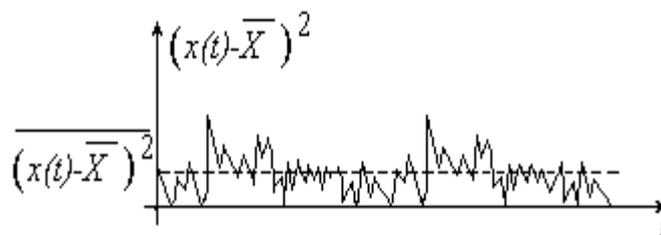


Рисунок 2 – Исследуемый случайный процесс и его дисперсия

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

2.3 Полевые и фоновые свойства шумов в полупроводниках

Для построения зависимости величины регистрируемого шума полупроводникового прибора от значения постоянного напряжения на нем и наличии фоновой подсветки прибора мощностью P_ϕ рассмотрим входную цепь регистрирующего тракта установки (рис.3). Здесь обозначено: $R_{\text{фр}}$ - сопротивление полупроводникового прибора (фоторезистора, например, или 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:

$$V_0 = r \cdot j = V \frac{r}{R_{\text{фр}} + r}.$$

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

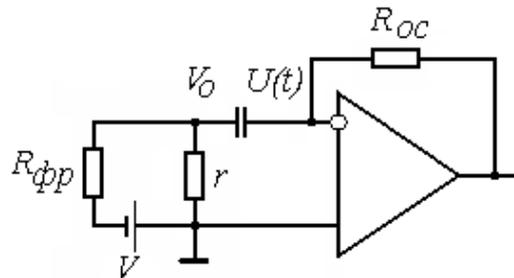


Рисунок 3 – Схема подключения источника шума (фоторезистора) к измерительному тракту

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

флуктуационная составляющая которого будет равна

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

Отсюда найдем шумовую компоненту как корень из дисперсии флуктуации:

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

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

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 позволяет легко 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:

$$S_x(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \overline{2 \cdot T a_n a_n^*},$$

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 τ равен нулю, то можно найти:

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

Данное выражение указывает на способ экспериментального измерения дисперсии: дисперсию шума можно измерить широкополосным вольтметром с квадратичным детектором и большой ёмкостью на выходе (ёмкость суммирует и накапливает заряд, т.е. интегрирует).

Как 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, а затем извлечь корень, чтобы вернуться к общепринятым единицам измерения – вольтам.. В результате этой операции оно станет однополярным пульсирующим с удвоенной частотой изменения во времени и будет содержать постоянную составляющую. Поясним это на примере синусоидального напряжения: в квадрате оно имеет вид

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

Операцию по переводу двухполярного напряжения в однополярное выполняет известный в радиотехнике квадратичный детектор, представляющий собой мост Уистона, составленный из четырех диодов. Такие детекторы стоят в любом выпрямителе сетевого напряжения. В отличие от выражения (10) квадратичный детектор не возводит в квадрат поданный на него сигнал. Его функция преобразования входного сигнала может быть описана выражением

$$\sqrt{(A \cos x)^2} = A \sqrt{\left(\frac{1 + \cos 2x}{2} \right)}. \quad (11)$$

Необходимая для вычисления дисперсии операция усреднения во времени реализуется установкой на выходе диодного мостика конденсатора большой ёмкости. Что получим на выходе? Усреднение правой части выражения (11) с учетом извлечения корня даст константу $1/\sqrt{2}$, которая, будучи умноженной на

амплитуду входного сигнала A , 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 экспериментально 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. Поэтому для изучения шума необходимы **нановольтметры** 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 нановольтметры**. Они представляют собой вольтметры, способные регистрировать напряжения до единиц нановольт - 10^{-9} В и имеющие узкую по величине (1 Гц) полосу пропускания и перестраиваемую оператором его центральной частоты полосы пропускания. Последнее достигается установкой на входе нановольтметра перестраиваемого полосового фильтра. Измеряемая таким прибором амплитуда шума называется **спектральной плотностью шума**. С точки зрения физической интерпретации спектральной плотности шума поведение шума во всей полосе исследованных частот можно объяснить, предположив, что он создается суммированием напряжений от множества независимых источников, вырабатывающих каждый своё синусоидального напряжения случайной амплитуды и частоты. Амплитуда каждого источника равна спектральной плотности шума.

3 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем общая природа возникновения шума в полупроводниковых приборах оптоэлектроники?
2. Какие основные виды шумов существуют в полупроводниковых приборах?
3. В чем физическая природа возникновения теплового шума?
4. Почему для возникновения теплового шума в полупроводнике необходимо наличие в нем свободных носителей заряда?

5. Почему для возникновения теплового шума в твердом теле необходимо чтобы его температура была отличной от 0 К?
6. Как скажется на спектральной плотности теплового шума двухполосника, составленного из сопротивления и параллельной ему емкости?
7. В чем причина возникновения дробового шума?
Как выглядит спектральная характеристика дробового шума?
8. Какие физические процессы приводят к возникновению генерационно-рекомбинационного шума?
9. Как выглядит спектральная характеристика дробового шума?
10. Каковы причины нулевого среднего значения шума?
11. Как выглядит спектральная характеристика теплового шума?
12. Что такое дисперсия случайного процесса и каков ее физический смысл?
13. Что такое плотность вероятности случайного процесса?
14. Перечислите основные распределения плотности вероятности случайных процессов, протекающих в полупроводниковых приборах.
15. Что такое автокорреляционная функция случайного процесса и что она характеризует в реальных физических приборах?
16. Что такое спектральная плотность шумового напряжения?
17. Как экспериментально измерить спектральную плотность шума?
18. В чем сущность метода Ланжевена в применении к анализу случайных процессов, протекающих в полупроводниковых приборах?
19. В чем сущность теоремы Винера-Хинчина, используемой в теории шумов полупроводниковых приборов?
20. Какой из видов шумов доминирует в полупроводниковых приборах на низких частотах, на средних частотах и на высоких частотах измерения?

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

4.1 Структурная схема лабораторной установки

Структурная схема лабораторной установки для измерения шумовых свойств полупроводниковых приборов приведена на рис. 4. Здесь обозначено: Z – исследуемый двухполосник (фоторезистор или фотодиод); МУС – малошумящий селективный усилитель, предназначенный для усиления шума исследуемого объекта; V_1 – источник постоянного напряжения смещения исследуемого фоторезистора R_{ϕ} ; ВТМ-1 – вольтметр для измерения постоянного напряжения смещения на фоторезисторе; СНВ – селективный нановольтметр типа «Unipan 237», предназначенный для измерения шумового напряжения; ОСЦ – осциллограф, предназначенный для визуального наблюдения шумовых процессов в фоторезисторе; D1 – светодиод, предназначенный для создания фоновой засветки P_{ϕ} исследуемого фоторезистора (фотодиода); K1 – выключатель фоновой засветки.

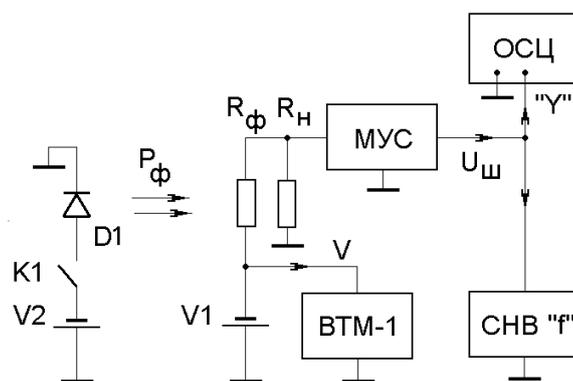


Рисунок 4 – Структурная схема измерительной установки

4.2 Конструкция и электрическая схема модуля исследуемых приборов

В качестве исследуемых приборов использованы следующие объекты: фоторезистор марки СФ3-4Б, фоторезистор марки ФР-764, фотодиод кремниевый ФД и постоянный резистор R. Они собраны в отдельном выносном модуле, который подключается к усилителю шумов с помощью кабеля через байонетный разъём (рис. 5). Для исследования влияния фоновой засветки на шумовые свойства исследуемого прибора предусмотрена подача через другой байонетный разъём постоянного напряжения величиной 10 В на красный светодиод, расположенный внутри модуля.

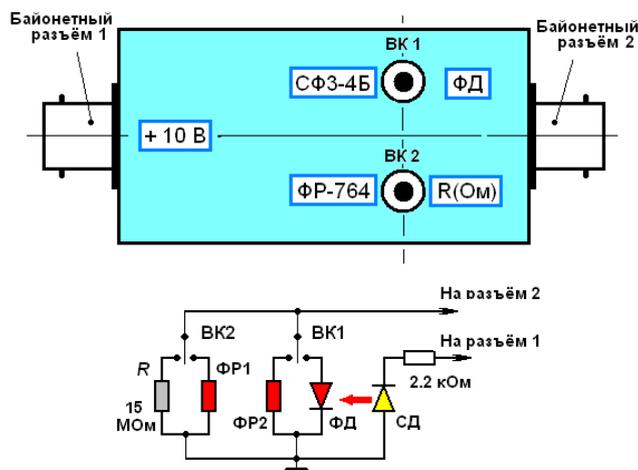


Рисунок 5 – Лицевая сторона модуля для исследуемых приборов и его принципиальная схема

Находящиеся на лицевой стороне модуля переключатели ВК1 и ВК2 со средним нейтральным положением позволяют поочерёдно подключать к входу усилителя тот или иной исследуемый объект. Подключаемые объекты указаны слева и справа от переключателя. Среднее положение переключателя соответствует отключению обоих объектов.

5 ЗАДАНИЕ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

В данной работе необходимо измерить полевые и частотные зависимости шумового напряжения полупроводникового фоторезистора (или фотодиода по заданию преподавателя) 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 полупроводниковом приборе и частоты измерения необходимо вычислить его основные параметры. Это достигается последовательным выполнением следующих действий.

Измерение частотных зависимостей шума

1. С помощью трех лимбов на передней панели СНВ «Unipan 237» установите указанное преподавателем начальное значение частоты измерения шума. Нажатием клавиши «40 db» переключателя «Octave selectivity» также на передней панели «Unipan 237» переведите прибор в режим селективного измерения шума с полосой измерения $\Delta f = 1$ Гц. Подключите к входу СНВ постоянное сопротивление величиной 15 МОм.

2. Измерьте частотные зависимости теплового шума резистора, изменяя частоту измерения f с помощью лимбов по последовательности: 10 Гц, 20 Гц, 40 Гц, 60 Гц, 100 Гц, 200 Гц, 400 Гц, 600 Гц, 1 кГц, 2 кГц, 4 кГц, 6 кГц, 10 кГц. Значения шумового напряжения считывайте со стрелочного прибора нановольтметра, при необходимости на низких частотах применяйте дополнительный фильтр низких частот (нажатием клавиши «Time constant» под стрелочным прибором СНВ).

3. Закончив измерения, полученные значения шумового напряжения $U_{ш.тепл}$ прологарифмируйте по основанию 10 и в двойном логарифмическом масштабе нарисуйте график $U_{ш.тепл}(f)$.

4. Подключите к входу СНВ «Unipan 237» выходной кабель фоторезисторного приемника. Затемните фотоприемник тканью, включите источник питания фотоприемника и зарегистрируйте на экране осциллографа шум фоторезистора. С помощью источника V1 и вольтметра ВТМ-1 установите напряжение смещения фоторезистора равным нулю. Повторив процедуру п.2 данного задания, измерьте частотную зависимость шумового напряжения фоторезистора $U_{ш}(f)$.

5. Измените значение напряжения смещения фоторезистора на данное преподавателем и повторите измерения шума фоторезистора при другом значении V. Повторите эту процедуру столько раз, сколько значений напряжения смещения задаст преподаватель (не менее трех).

6. Закончив измерения, пронормируйте массивы $U_{ш}(f)$ на ранее измеренные значения напряжения шума резистора $U_{ш.тепл}$. Полученные значения $U_{шн}(f)$ прологарифмируйте по основанию 10 и нарисуйте графики частотных зависимостей шума фоторезистора при различных напряжениях на нем $U_{шн}(f)$. Объясните полученные кривые.

7. Из полученных частотных зависимостей вычислите значение времени жизни носителей заряда.

5.2 Измерение полевых зависимостей шума

1. Последовательно с помощью лимбов на СНВ установите на СНВ заданное преподавателем значение частоты (не менее трех), на которой будете проводить измерение полевых зависимостей шумового напряжения фоторезистора.

2. Задавая напряжение смещения с помощью источника постоянного напряжения V_1 и, контролируя его вольтметром ВТМ-1, измерьте зависимость шумового напряжения фоторезистора $U_{ш}$ от напряжения V . Повторите эту процедуру для всех частот измерения шума, заданных преподавателем.

3. Включите синий светодиод фоновой подсветки на оптическом блоке установки, с помощью преподавателя подберите уровень фоновой засветки фоторезистора и проведите измерение по п.2 этого задания.

4. Закончив измерения, полученные значения шумового напряжения $U_{ш}(V)$ прологарифмируйте по основанию 10 и в логарифмическом масштабе нарисуйте график полученной зависимости.

5. Объясните полученные кривые как в условиях полной темноты, так и при наличии фоновой подсветки.

6. Составьте отчет и подготовьтесь к его защите.

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

6 ТРЕБОВАНИЯ К СОСТАВЛЕНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

1. Отчет по лабораторной работе в обязательном порядке должен содержать следующие разделы:

- цель лабораторной работы, задание на ее выполнение;
- 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 в работе . каждого
4. В соответствии с рейтинговой системой качество выполнения лабораторной работы и оформления отчета оценивается в баллах, которые суммируются с баллами по практическим и лекционным занятиям.

7 РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Давыдов, В.Н. Основы оптоэлектроники: учебное пособие / В.Н. Давыдов. - Томск, ТУСУР, 2021. – 165 с.
2. Давыдов, В.Н. Основы оптоэлектроники: учебно-методическое пособие / В.Н. Давыдов. - Томск, ТМЦ ДО, 2010. – 99 с.
3. Бендат, М. Измерение и анализ случайных процессов / М. Бендат. - М., Мир, 1974. – 485с.
4. Ван дер Зил. Шум. Источники, описание, измерение / Ван дер Зил. – М.: Сов. Радио. 1973. – 225 с.