

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра микро- и наноэлектроники

**С. В. Гранько, О. В. Дворников**

***ИСПЫТАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ  
ПРИБОРОВ И ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ***

Лабораторный практикум  
по курсу «Полупроводниковые приборы и элементы интегральных микросхем»  
для студентов специальностей  
1- 41 01 02 «Микро- и наноэлектронные технологии и системы»,  
1- 41 01 03 «Квантовые информационные системы»  
всех форм обучения

Минск БГУИР 2011

УДК [621.382.2/3+621.3.049.77]-048.24(076)

ББК 32.852+32.844.1я73

Г77

**Гранько, С. В.**

Г77 Испытание и исследование полупроводниковых приборов и элементов интегральных схем : лаб. практикум по курсу «Полупроводниковые приборы и элементы интегральных микросхем» для студ. спец. 1-41 01 02 «Микро- и наноэлектронные технологии и системы», 1-41 01 03 «Квантовые информационные системы» всех форм обуч. / С. В. Гранько, О. В. Дворников. – Минск : БГУИР, 2011. – 43 с. : ил.

ISBN 978-985-488-550-6.

В лабораторном практикуме обобщены основные сведения о процессах измерения параметров полупроводниковых приборов. Состоит из четырех лабораторных работ. В каждой даны описания методик измерения параметров полупроводниковых приборов с использованием различных типов измерительного оборудования.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям «Микро- и наноэлектронные технологии и системы», «Квантовые информационные системы».

УДК [621.382.2/3+621.3.049.77]-048.24(076)

ББК 32.852+32.844.1я73

ISBN 978-985-488-550-6

© Гранько С. В., Дворников О. В., 2011  
© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2011

## СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа №1. Методы и схемы измерения параметров физических эквивалентных схем и дифференциальных параметров биполярных и полевых транзисторов.....	4
Лабораторная работа №2. Методы и схемы измерения тепловых параметров полупроводниковых приборов .....	11
Лабораторная работа №3. Исследование вольт-амперных характеристик диодов и транзисторов осциллографическим методом.....	15
Лабораторная работа №4. Исследование вольт-амперных характеристик транзисторов с использованием измерителя параметров полупроводниковых приборов ИППП-1 .....	27

Библиотека БГУИР

## Лабораторная работа №1

### Методы и схемы измерения параметров физических эквивалентных схем и дифференциальных параметров биполярных и полевых транзисторов

#### 1.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить схемы измерения параметров физических эквивалентных схем и дифференциальных параметров биполярных и полевых транзисторов; измерить  $C_{э}$ ,  $C_{к}$ ,  $S$  и  $h$  биполярного транзистора и  $S$ ,  $C_{с.и}$  МОП-транзистора.

#### 1.2. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ:

- 1) лабораторный макет со схемами измерения параметров, перечисленных в п. 1.1;
- 2) ампервольтметр В7-27 – 2 шт.;
- 3) генератор низкой частоты ГЗ-118;
- 4) генератор высокой частоты;
- 5) образцы.

#### 1.3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1.3.1. Анализ измеряемых параметров. Проведение этой лабораторной работы преследует две цели: изучение схем измерений некоторых основных параметров биполярных и полевых транзисторов и измерение параметров, перечисленных в п. 1.1.

1.3.2. Дифференциальные параметры: крутизна  $S$  биполярных и полевых транзисторов, выходная проводимость  $h_{22}$  и коэффициент передачи эмиттерного тока  $h_{21}$  биполярного транзистора, как и все параметры четырехполюсника, могут быть измерены различными методами: графическим методом по статическим характеристикам, методом приращений постоянных токов и напряжений, а также методом измерения переменных токов и напряжений малой величины.

Мерой соответствующего параметра является наклон касательной к характеристике в заданной рабочей точке. При использовании графического метода тангенс угла наклона касательной измеряется и заменяется секущей. Этот метод проиллюстрирован на рис. 1.1.

Параметры, определенные по представленным на рис. 1.1 характеристикам, образуют матрицу  $h$ -параметров. Они являются вещественными, поскольку определены при частоте  $f = 1,0$  кГц. Из-за того что касательная заменена секущей, полученные графическим методом данные имеют недостаточную точность.

Свойства биполярного транзистора как линейного четырехполюсника на низких частотах и малых сигналах могут быть определены с помощью линейных уравнений:

$$\begin{cases} U_1 = h_{11}I_1 + h_{12}U_2, \\ I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}U_2, \end{cases} \quad (1.1)$$

где  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $U_1$ ,  $U_2$  – малые амплитуды переменных токов и напряжений на низкой частоте.

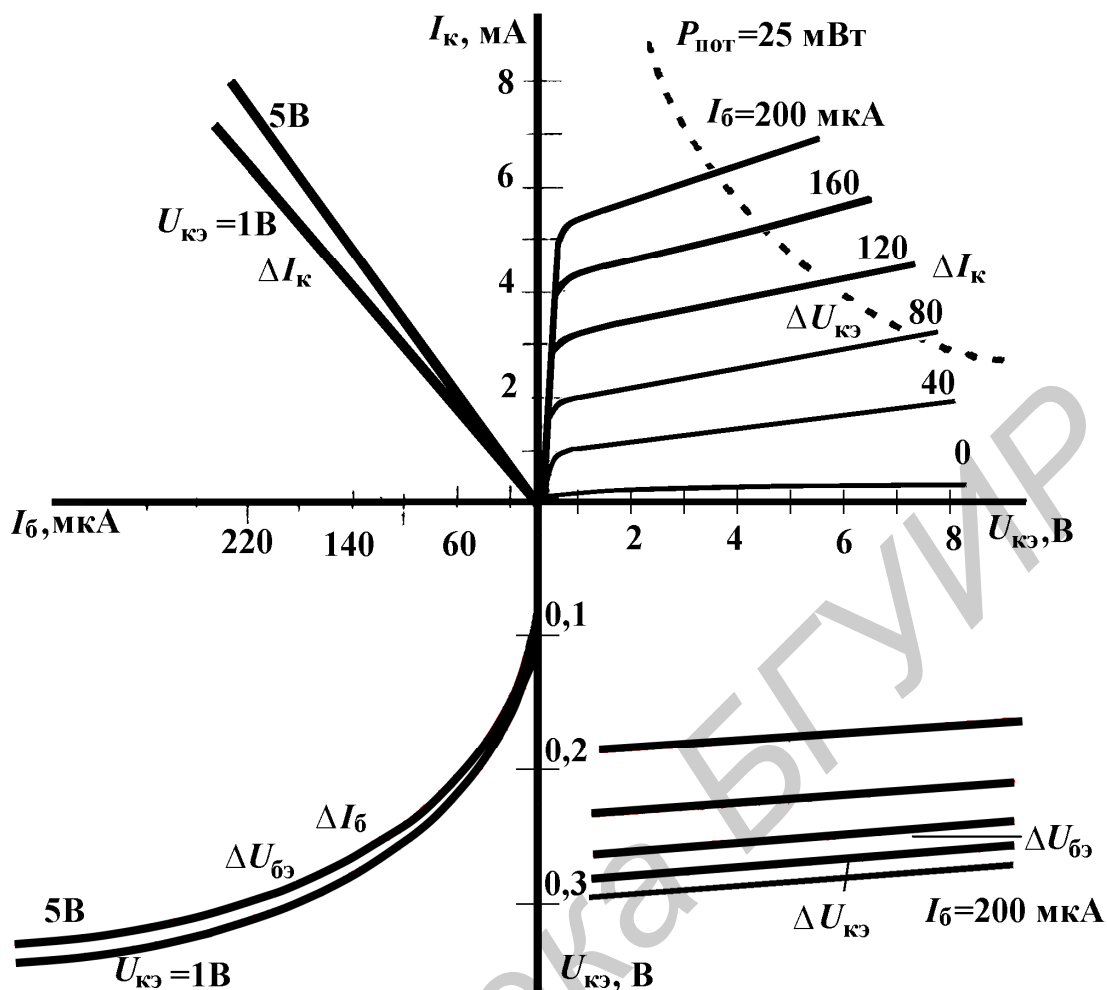


Рис. 1.1. Статические характеристики транзистора

В этих уравнениях коэффициенты  $h_{12}, h_{21}$  являются безразмерными,  $h_{11}$  имеет размерность сопротивления, а  $h_{22}$  – проводимости; отсюда название «гибридные параметры».

Метод измерения этих параметров основан на наложении на постоянные составляющие переменных токов низкой частоты и малой амплитуды. Переменные сигналы подключаются поочередно к обеим парам зажимов транзистора 1–1 (входные) и 2–2 (выходные), и проводят измерение переменных токов и напряжений в цепях. Пара зажимов, на которые в процессе измерения не подается сигнал, остается разомкнутой для переменной составляющей (режим холостого хода).

Поскольку входное сопротивление биполярного транзистора мало, то параметры  $h_{11}$  и  $h_{21}$  измеряются в режиме генератора переменного тока на входе при коротком замыкании по переменному сигналу на выходе ( $U = 0$ ). Выходное сопротивление транзистора (особенно в схеме с общей базой) достаточно велико, и параметры  $h_{12}$  и  $h_{22}$  измеряются в режиме генератора напряжения на выходе при холостом ходе по переменному току на входе ( $I_1 = 0$ ).

Гибридные параметры могут быть измерены непосредственно [метод вытекает из уравнения (1.1)] или мостовым методом.

Свойства полевого транзистора как линейного четырехполюсника на низких частотах и малых сигналах могут быть определены с помощью линейных уравнений

$$\begin{cases} I_1 = y_{11}U_1 + y_{12}U_2, \\ I_2 = y_{21}U_1 + y_{22}U_2. \end{cases} \quad (1.2)$$

В этих уравнениях коэффициенты  $y_{11} \dots y_{22}$  имеют размерности проводимости.

Свойства полевых транзисторов удобно анализировать с помощью у-параметров, т. к. они обладают большими входными и выходными сопротивлениями и поэтому легко создать режимы генератора напряжения на входе и выходе транзистора.

Параметры физических эквивалентных схем биполярных и полевых транзисторов (в данном случае  $C_з$ ,  $C_к$ ,  $C_{с.и}$ ) измеряются с помощью метода замещения, который заключается в одновременном измерении исследуемого параметра и эталона, величина которого заранее известна и определена с большой точностью. Причем номиналы пассивных элементов подбираются таким образом, чтобы при подключении эталона величина тока в измерительной цепи полностью определялась сопротивлением эталона, а при включении в измерительную цепь транзистора величина тока определяется сопротивлением измеренного параметра транзистора.

Мостовые схемы измерения параметров транзисторов принципиально могут обеспечить более высокую точность измерений относительно схем, основанных на методе непосредственного измерения токов и напряжений. Это следует из самого способа измерения, а также из того факта, что транзистор обладает комплексными параметрами уже на низких частотах. При непосредственных измерениях это невозможно учесть, в то же время при измерении с помощью моста, введя в мост дополнительные реактивные элементы, можно получить очень острую настройку моста на нулевой баланс и тем самым повысить точность измерений. Однако введение дополнительных элементов настройки усложняет измерение мостовым методом по сравнению с методом непосредственного отсчета.

#### 1.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Крутизна МОП-транзистора определяется выражением

$$S = \left. \frac{dI_c}{dU_{зи}} \right|_{U_{си} = const} \approx \left. \frac{I_c}{U_{зи}} \right|_{U_{си} = const} \quad (1.3)$$

где  $I_c$  – величина переменного тока стока;  $U_{зи}$  – величина переменного напряжения затвор – исток.

Крутизна биполярного транзистора (схема измерения рис. 1.2) определяется выражением

$$S = \left. \frac{dI_{\kappa}}{dU_{\text{эб}}} \right|_{U_{\text{кб}}=\text{const}} = \left. \frac{I_{\kappa}}{U_{\text{эб}}} \right|_{U_{\text{кб}}=\text{const}}, \quad (1.4)$$

где  $I_{\kappa}$  – величина переменного тока коллектора,  $U_{\text{эб}}$  – величина переменного напряжения эмиттер–база.

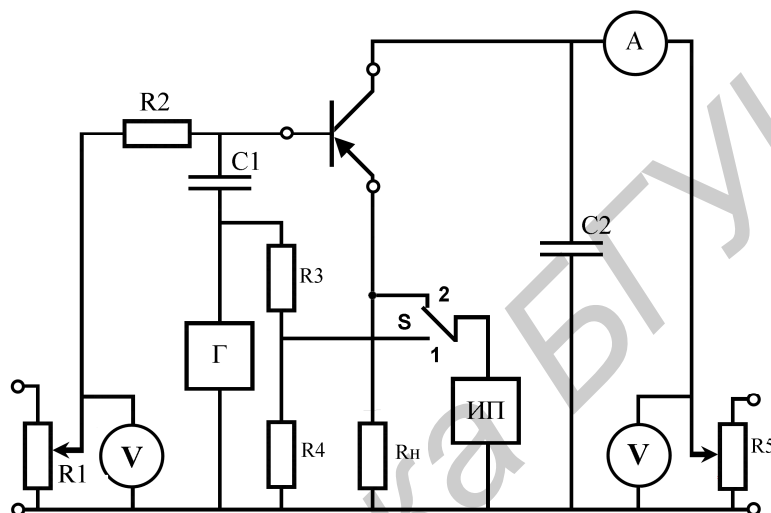


Рис. 1.2. Схема измерения  $S$  биполярного транзистора

Проанализируем схему измерения крутизны МОП-транзистора, включенного по схеме с общим истоком (рис. 1.3).

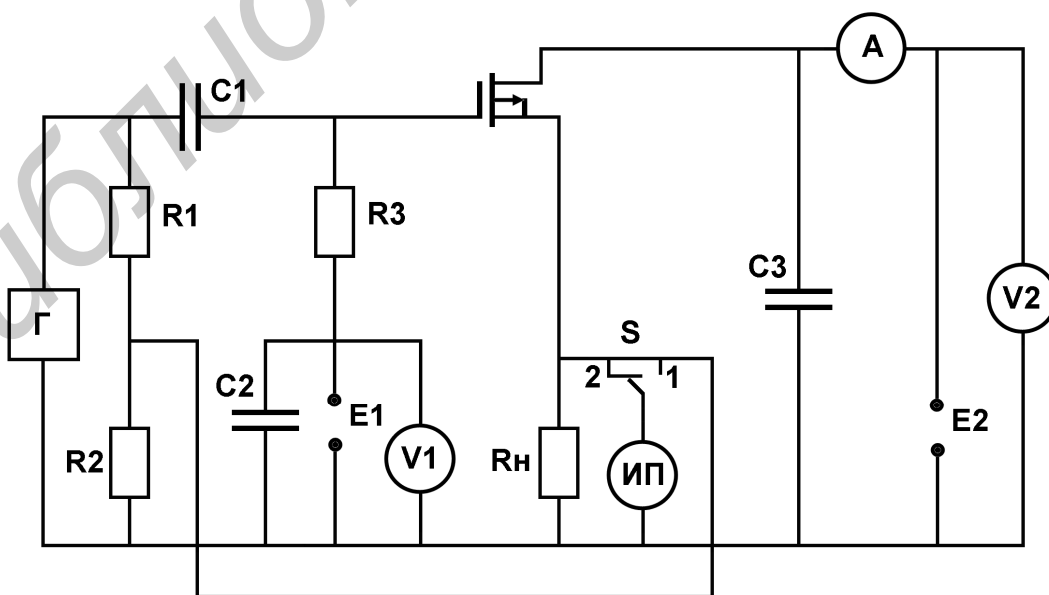


Рис. 1.3. Схема измерения  $S$  полевого транзистора

Когда переключатель находится в положении 1, измерительный прибор ИП фиксирует величину переменного напряжения  $U_1$ , которая равна

$$U_1 = U_{3и} \frac{R_2}{(R_1 + R_2)} . \quad (1.5)$$

При переводе переключателя в положение 2 измерительный прибор фиксирует величину переменного напряжения

$$U_2 = I_c R_n . \quad (1.6)$$

Следовательно, крутизну можно определить как

$$S = \frac{I_c}{U_{3.и}} = \frac{U_2}{U_1} \frac{R_2}{R_n (R_1 + R_2)} . \quad (1.7)$$

Входная  $C_{3.и}$ , проходная  $C_{3.с}$  и выходная  $C_{с.и}$  емкости МОП-транзистора определяются методом замещения в режиме холостого хода по переменному току на входе транзистора ( $I_1 = 0$ ). Генератор переменного напряжения включается на выходе транзистора. Принцип измерения емкостей рассмотрим на схеме измерения  $C_{с.и}$  (рис. 1.4).

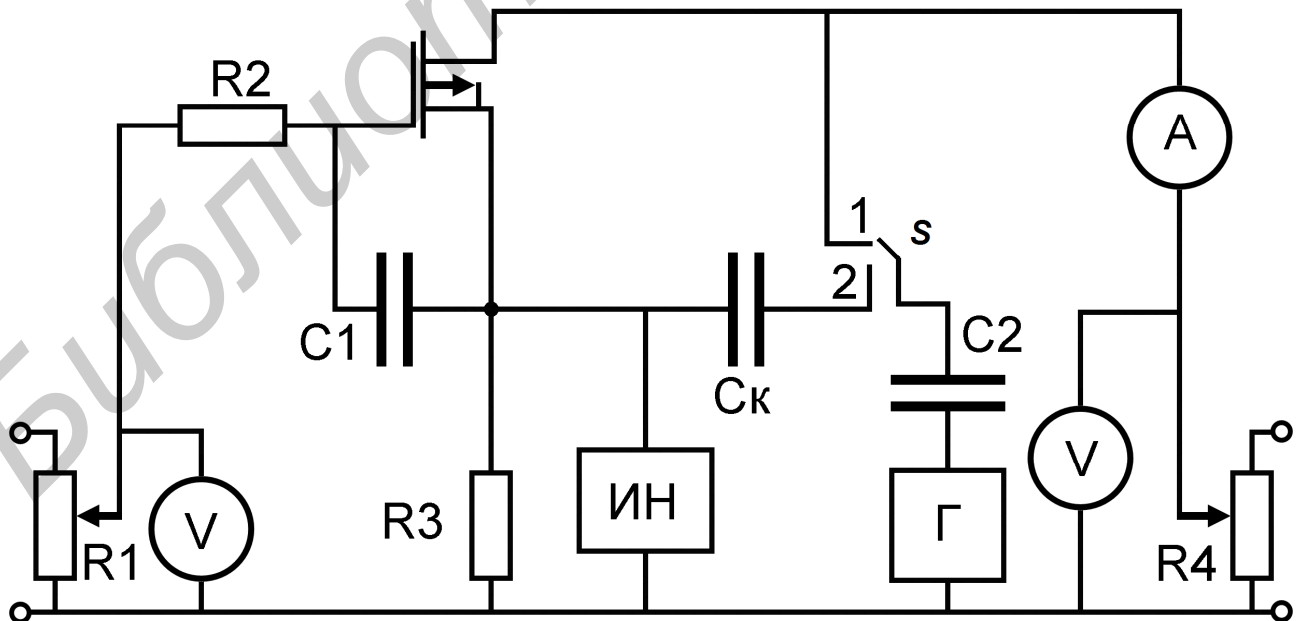


Рис. 1.4. Схема измерения  $C_{с.и}$  полевого транзистора



Когда переключатель  $S$  находится в положении 1, электронный измеритель напряжения фиксирует величину напряжения  $U_1$ :

$$U_1 = IR_3 = \frac{U_\Gamma R_3}{\left[ \left( \frac{1}{\omega C_2} \right) + \left( \frac{1}{\omega C_K} \right) + R_3 \right]}, \quad (1.8)$$

где  $U_\Gamma$  – напряжение на высокочастотном генераторе.

Так как величины пассивных элементов, входящих в схему измерения, должны удовлетворять условиям  $C_2 \geq 100C_K$ ,  $R_3 \leq \frac{0,1}{\omega C_K}$ , то

$$U_1 = U_\Gamma \omega C_K R_3, \quad (1.9)$$

где  $C_K$  – калибровочная емкость, по величине которой будет определяться величина выходной емкости  $C_{с.и}$ .

Когда переключатель находится в положении 2, электронный измеритель напряжения ЭИН фиксирует величину  $U_2$ :

$$U_2 = IR_3 = \frac{U_\Gamma R_3}{\left[ \left( \frac{1}{\omega C_2} \right) + \left( \frac{1}{\omega C_{с.и}} \right) + R_3 \right]}. \quad (1.10)$$

Так как величины элементов, входящих в выражение (1.10), должны удовлетворять условиям  $C \geq 100C_K$ ,  $R_3 \leq \frac{0,1}{\omega C_{с.и}}$ , то выражение (1.10) можно записать как

$$U_1 = U_\Gamma \omega C_{с.и} R_3. \quad (1.11)$$

Следовательно, величину проходной емкости можно определить по формуле

$$C_{с.и} = \frac{U_2}{U_1} C_K. \quad (1.12)$$

## 1.5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1.5.1. Измерение всех параметров проводится методом замещения, т.е. в режиме калибровки (переключатель находится в положении «1») фиксируется напряжение на эталонном элементе, а в режиме измерения (положение «2») измеряется падение напряжения на исследуемом элементе. Напряжение измеряется ампервольтметром В7-27.

1.5.2. При измерении дифференциальных параметров ( $S$  и др.) к клеммам «Г» подключать генератор напряжения. Амплитуда напряжения и частота задается преподавателем.

1.5.3. При измерении емкостей  $C_э$ ,  $C_к$ ,  $C_{с.и}$  и  $C_{з.и}$  к клеммам «Г» подключить генератор высокой частоты (ГВЧ). Амплитуда напряжения и частота задаются преподавателем.

## 1.6. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ

1.6.1. Рассчитать  $S$  биполярного транзистора по формуле  $S = \frac{U_2}{U_1} \frac{R_4}{R_H(R_3 + R_4)}$ ,

где  $R_H = 4,7$  кОм,  $R_4 = 5,6$  кОм,  $R_3 = 10$  кОм.

1.6.2. Рассчитать  $C_э$  и  $C_к$  (коллекторную) по формуле  $C = \frac{U_2}{U_1} C_к$ , где  $C_к = 15$  пФ.

1.6.3. Рассчитать  $S$  биполярного транзистора по формуле  $S = \frac{U_2}{U_1} \frac{R_2}{R_H(R_1 + R_2)}$ ,

где  $R_H = 4,7$  кОм,  $R_2 = 5,6$  кОм,  $R_1 = 10$  кОм.

1.6.4. Рассчитать  $C_{с.и}$  по формуле  $C = \frac{U_2}{U_1} C_к$ , где  $C_к = 10$  пФ.

## 1.7. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1.7.1. Описание измеряемых параметров.

1.7.2. Описание схем их измерения и основных узлов.

1.7.3. Результаты расчета параметров физических эквивалентных схем и дифференциальных параметров.

## Лабораторная работа №2

### Методы и схемы измерения тепловых параметров полупроводниковых приборов

#### 2.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить методы и схемы измерения тепловых параметров полупроводниковых приборов; ознакомиться с термочувствительными параметрами биполярных транзисторов, измерить в диапазоне температур  $T = 20 \dots 60 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $U_{э.б} = f(T)$ ,  $I_{к.60} = f(T)$  и тепловое сопротивление  $R_T$  для биполярных транзисторов.

#### 2.2. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ:

- 1) термостат (рис. 2.1);
- 2) цифровой микроамперметр;
- 3) ампервольтметр В7-27;
- 4) макет для измерения  $U_{э.б} = f(T)$ ,  $I_{к.60} = f(T)$ ;
- 5) образцы.



Рис. 2.1. Термостат ТС-1

#### 2.3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

##### 2.3.1. Тепловые процессы в полупроводниковых приборах.

В процессе эксплуатации в полупроводниковых приборах тепловая энергия выделяется внутри кристалла полупроводника в токоведущих частях и проводниках вследствие термоэлектрических эффектов и джоулевых потерь.

Термоэлектрические эффекты возникают в местах контактных разностей потенциалов, которыми являются *p-n*-переходы, соединения полупроводника с металлическими выводами и другие неоднородности полупроводника. Тепловой режим полупроводникового прибора в основном определяется джоулевым теплом.

Джоулево тепло выделяется в результате столкновения электронов с атомами полупроводникового кристалла и токоведущих элементов, представляющими собой сопротивление поступательному движению электронов.

Место выделения тепловой энергии по объему кристалла вследствие джоулевых потерь определяется полярностью приложенного напряжения к  $p-n$ -переходу. При приложении напряжения в обратном направлении тепловая энергия выделяется в основном в области  $p-n$ -перехода, где практически происходит падение всего напряжения. При пропускном направлении напряжения сопротивление объема полупроводника становится сравнительным с сопротивлением  $p-n$ -перехода и тепловая энергия выделяется по всему объему полупроводникового кристалла.

Величину джоулевых потерь диода, работающего в статическом электрическом режиме, определяют, как произведение силы тока  $I$ , который протекает через диод, на напряжение  $U$  на нем:

$$P = IU . \quad (2.1)$$

У транзистора тепловые потери определяются суммой потерь на коллекторном  $P_k$  и эмиттерном  $P_э$   $p-n$ -переходах, а также в области базы  $P_б$ :  $P = P_k + P_э + P_б$ .

Однако величины  $P_э$  и  $P_б$  малы, поскольку в активных режимах работы транзистора токи эмиттера  $I_э$  и коллектора  $I_k$  практически одинаковы, а напряжение коллектора  $U_k$  намного выше напряжения  $U_э$ , поэтому основная часть тепловой энергии выделяется в области коллекторного  $p-n$ -перехода, а мощность тепловой энергии определяется произведением силы тока в цепи коллектора на напряжение на нем:

$$P = I_k U_k . \quad (2.2)$$

В интегральных схемах тепло выделяется на нескольких  $p-n$ -переходах и резисторах. Физический механизм этого процесса на  $p-n$ -переходах такой же, как на диоде и транзисторе, а на резисторах представляет собой джоулевы потери, которые находятся по формуле  $P = I^2 R$ , где  $I$  – ток, протекающий через резистор,  $R$  – сопротивление резистора. Мощность тепловых потерь интегральных схем определяется суммарной приложенной мощностью.

2.3.2. Измерение параметров  $p-n$ -переходов с помощью термочувствительных параметров.

Измерение теплового сопротивления непосредственно вытекает из определения этого сопротивления. При этом различают два случая: а) постоянная температура перехода; б) постоянная температура окружающей среды.

На рис. 2.2, а показана схема измерения теплового сопротивления при постоянной температуре окружающей среды. В качестве термочувствительного параметра использовано напряжение  $U_{э,б}$ . Транзистор находится при постоянной температуре.

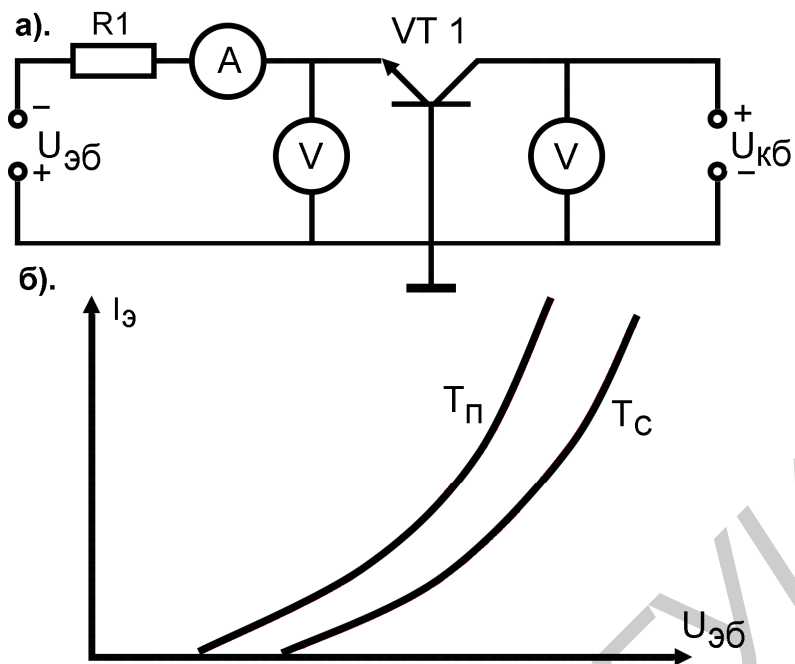


Рис. 2.2. Схема для измерения теплового сопротивления в непрерывном режиме при использовании зависимости  $U_{э.б}$  от температуры перехода (а); влияние температуры перехода на ВАХ (б)

При выбранном значении  $I_э$  измеряют напряжение  $U_{э.б}$ , а затем после подведения к коллекторному переходу электрической мощности и выдержки некоторого времени для установления более высокой температуры перехода измеряют напряжение  $U_{э.б}$  (рис. 2.2, б). Тепловое сопротивление рассчитывают по формуле

$$R_T = \frac{T_{кр} - T_k}{P}, \quad (2.3)$$

где  $T_{кр}$  – температура кристалла,  $T_k$  – температура корпуса,  $P$  – мощность, выделяемая на приборе.

В качестве термочувствительного параметра использовано напряжение  $U_{к.б0}$ . Определение  $R_T$  производится аналогично.

## 2.4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

2.4.1. Снять зависимость  $I_{к.б0} = f(T)$ .

2.4.1.1. Вставить в разъем, расположенный в стенде, биполярный транзистор (интегральную сборку или дискретный прибор).

2.4.1.2. Вставить транзистор с разъемом в термостат через специальное отверстие 1 согласно рис. 2.3.

2.4.1.3. Подать обратное напряжение на коллекторный  $p-n$ -переход (величину  $U_{к.б}$  узнать у преподавателя).

2.4.1.4. Нажатием клавиши 2 ввести термостат в режим «Установка температуры».

2.4.1.5. Нажатием клавиш 3 и 4 установить температуру нагрева от комнатной до 60 °С.

2.4.1.6. Нажатием клавиши 2 термостат ввести в режим «Нагрев».

2.4.1.7. Измеряя через 5 °С величину  $I_{к.б0}$ , снять зависимость  $I_{кб0} = f(T)$ .

2.4.2. Снять зависимость  $U_{э.б} = f(T)$ .

2.4.2.1. Переключить макет в режим измерения  $U_{э.б}$ .

2.4.2.2. Процесс нагрева производить аналогично пп. 2.4.1.4 – 2.4.1.6.

2.4.2.3. Измеряя через 5 °С величину  $U_{э.б}$ , снять зависимость  $U_{э.б} = f(T)$ .

2.4.3. Анализ полученных зависимостей провести с использованием метода наименьших квадратов.

2.4.4. Провести саморазогрев образцов с использованием импульсного нагрева. Мощность импульса задается преподавателем.

2.4.5. Пользуясь уравнением (2.3), рассчитать тепловое сопротивление, полученное при использовании термочувствительных  $I_{к.б0}$  и  $U_{э.б}$

## 2.5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

2.5.1. Результаты измерений и соответствующие графики.

2.5.2. Схемы измерения термочувствительных параметров биполярных транзисторов.

2.5.3. Результаты расчета теплового сопротивления исследуемых приборов.

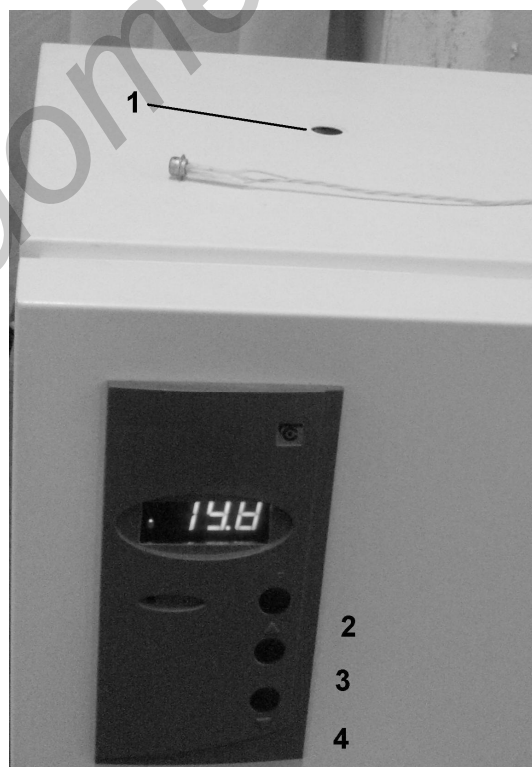


Рис. 2.3. Органы управления термостата

## Лабораторная работа №3

### Исследование вольт-амперных характеристик диодов и транзисторов осциллографическим методом

#### 3.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить методику и схемы для визуального наблюдения статических вольт-амперных характеристик диодов и транзисторов, ознакомиться с принципом действия, основными техническими данными и структурной схемой прибора для наблюдения характеристик транзисторов (ПНХТ).

#### 3.2. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ:

- 1) прибор для наблюдения характеристик транзисторов (ПНХТ);
- 2) исследуемые диоды и биполярные транзисторы.

#### 3.3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Статическими характеристиками принято называть связь постоянных значений напряжений и токов на внешних зажимах (электродах) полупроводникового прибора. Графически статические характеристики представляют в виде семейств зависимостей в координатах ток – напряжение, реже – в координатах ток – ток или напряжение – напряжение. Иногда статические характеристики называют вольт-амперными.

#### 3.4. НАЗНАЧЕНИЕ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ПРИБОРА ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРОВ

##### 3.4.1. Общее описание прибора

Прибор для наблюдения характеристик транзисторов ПНХТ (Л2-56) предназначен для визуального наблюдения статических вольт-амперных характеристик биполярных и полевых транзисторов и различного рода полупроводниковых диодов (рис. 3.1).

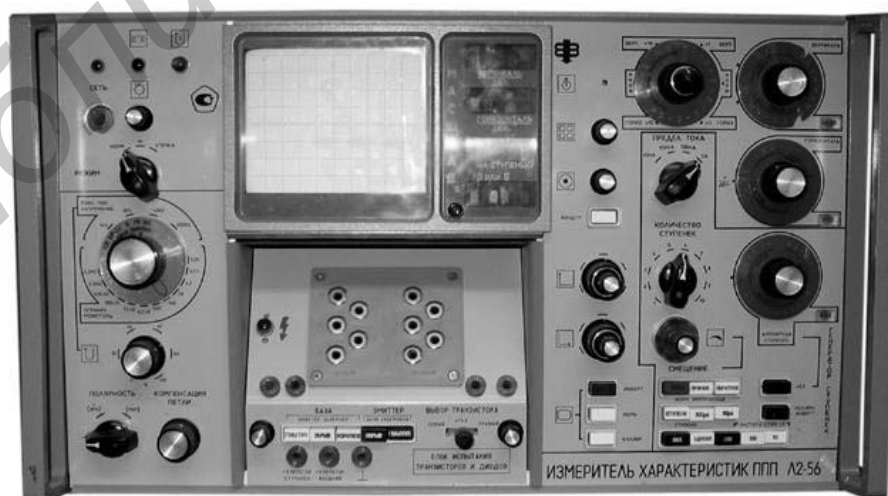


Рис. 3.1. Внешний вид ПНХТ (Л2-56)

Таким образом, вольт-амперные характеристики являются средством, наглядно иллюстрирующим качество транзистора, и широко используются при изготовлении транзисторов и при проектировании и расчете схем.

Известны четыре типа характеристик для транзисторов: входная, выходная и две проходные. Последние не получили практического применения, поэтому обычно в справочниках на полупроводниковые приборы приводятся входные и выходные характеристики для двух основных схем включения транзисторов — с общей базой (ОБ) и общим эмиттером (ОЭ).

Структурная схема прибора ПНХТ приведена на рис. 3.2. Основными узлами прибора являются:

- источник питания коллектора, который выдает напряжение пульсирующей формы, плавно регулируемой в двух диапазонах: от 0 до 20 В при токе до 10 А; от 0 до 200 В при токе до 1 А;

- генератор ступенчатого сигнала, который обеспечивает питание базовой и эмиттерной цепей испытуемого транзистора;

- усилитель вертикального отклонения «У»;

- усилитель горизонтального отклонения «Х»;

- индикатор;

- источник питания.

Прибор ПНХТ питается от сети переменного тока 220 В, с частотой  $50 \pm 0,5$  Гц.

На передней панели прибора кроме соответствующих переключателей, ручек регулировки и настроек имеются:

- а) переключатель «ТРАНЗИСТОР А – ТРАНЗИСТОР Б», имеет три положения: «ТРАНЗИСТОР А – СРЕДНЕЕ – ТРАНЗИСТОР Б». В среднем положении контактное приспособление для исследуемых транзисторов отключается от схемы прибора ПНХТ (рис. 3.3);

- б) переключатель заземления имеет два положения: ЗАЗЕМЛЕННАЯ БАЗА и ЗАЗЕМЛЕННЫЙ ЭМИТТЕР; клеммы для мощных транзисторов не переключаются (всегда заземлена клемма «Э»). Поэтому для исследования мощных транзисторов в схеме с ОБ необходимо базовый вывод испытуемого транзистора подключить к клемме «Э», а эмиттерный – к клемме «Б».

Для получения на экране прибора ПНХТ семейства характеристик (рис. 3.4.) исследуемого транзистора используются полуволны синусоидального напряжения, подаваемые в коллекторную цепь исследуемого транзистора.

В качестве сигнала параметра используются ступенчато изменяющиеся напряжение или ток, которые подаются в эмиттер или базу исследуемого транзистора в зависимости от схемы включения (с общей базой или с общим эмиттером).

Напряжения, пропорциональные токам в электродах испытуемого транзистора или напряжениям в них, подаются на входы усилителей вертикального и горизонтального отклонений, выходы которых в свою очередь подключены к отклоняющим пластинам осциллографической трубки.



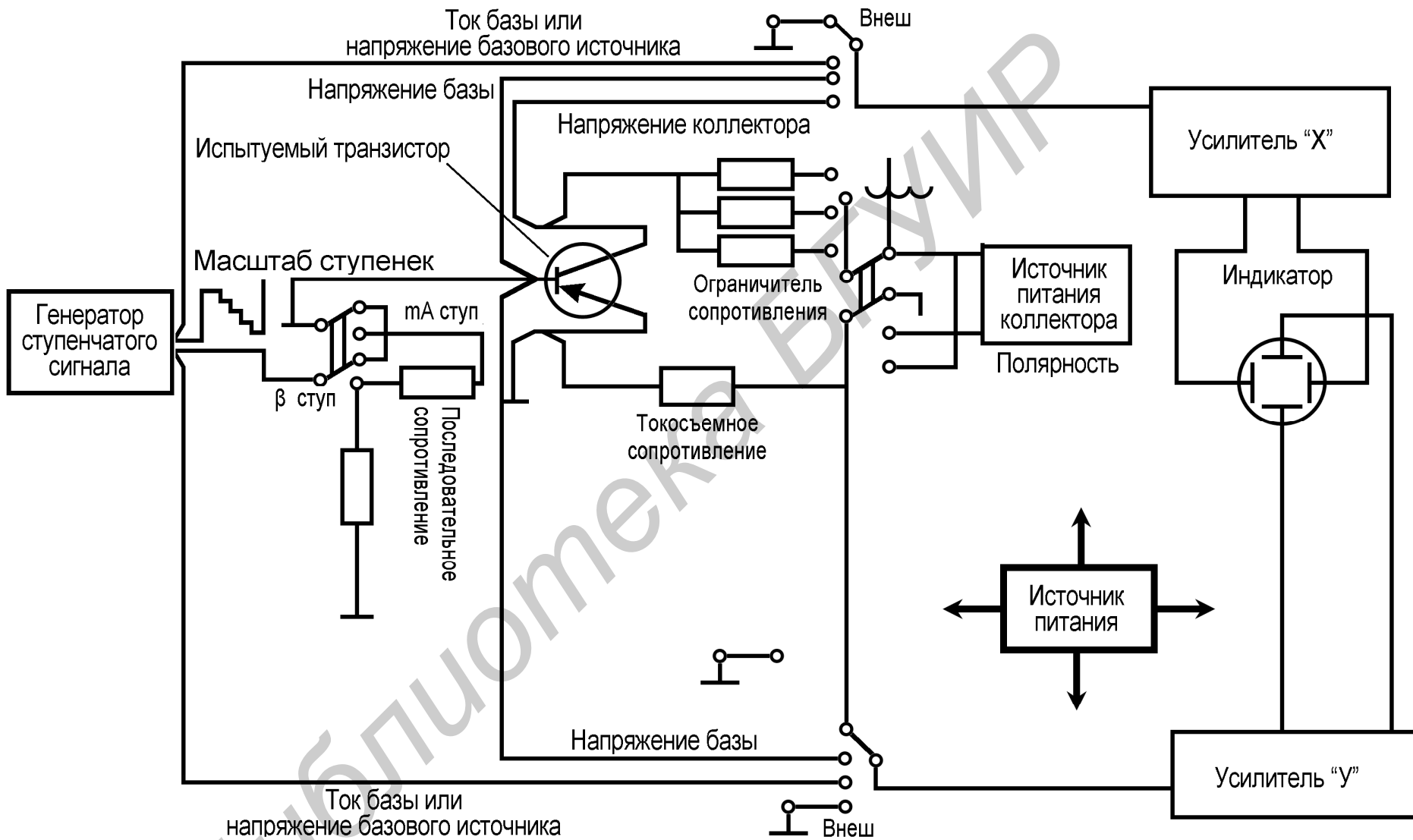


Рис. 3.2. Структурная схема прибора ПНХТ



Рис. 3.3. Переключатели на нижней панели прибора

Входы усилителей подключаются к различным электродам испытуемого транзистора в зависимости от типа наблюдаемой характеристики. Так, например, при наблюдении выходных характеристик типа  $I_k = f(U_{к.э})$  в схеме с ОЭ *n-p-n*-транзистора (см. рис. 3.4) усилитель горизонтального отклонения подключается к коллектору испытуемого транзистора, а усилитель вертикального отклонения – к токосъемному сопротивлению в цепи коллектора. При этом на пластины горизонтального отклонения подается напряжение, пропорциональное напряжению на коллекторе (полуволна синусоидального напряжения), а на пластины вертикального отклонения подается напряжение, пропорциональное току коллектора испытуемого транзистора.

Таким образом, на экране осциллографической трубки получается изображение характеристик  $I_k = f(U_{к.э})$  в прямоугольных координатах. При этом в базу подается ступенчато изменяющийся ток. Причем напряжение на коллекторе и ток в базе строго синхронизированы во времени таким образом, что в отрезок времени, когда прочерчивается характеристика, ток базы остается неизменным (одна ступенька).



Рис. 3.4. ВАХ на экране прибора

В отрезок времени, определяемый следующей ступенькой, вычерчивается еще одна кривая и т. д.

Фазовое соотношение сигнала параметра и сигнала аргумента может быть представлено в трех вариантах:

а) переход от одной ступеньки к следующей осуществляется при нулевом напряжении на коллекторе;

б) переход к следующей ступеньке осуществляется при максимальном напряжении на коллекторе;

в) один переход осуществляется при максимальном напряжении на коллекторе, а следующий – при нулевом.

#### 3.4.2. Статические параметры диодов и транзисторов

Система статических параметров диодов весьма проста. Каждый параметр характеризует прибор в одной из трех областей его характеристик:

$U_{пр}$  – прямое падение напряжения, т. е. напряжение на прямой ветви характеристики, измеренное при некотором значении прямого тока  $I_{пр}$ , заранее выбранном для данного типа прибора;

$I_{обр}$  – обратный ток, т. е. ток на обратной ветви характеристики, измеренный при некотором, заранее выбранном для данного типа прибора значении обратного напряжения  $U_{обр}$ ;

$U_{проб}$  – пробивное напряжение, т. е. напряжение на пробивном участке обратной ветви характеристики при некотором заранее выбранном значении обратного тока. Этот параметр имеет ограниченную область применения, его не следует путать с параметром «максимально допустимое обратное напряжение», который относится к другому классу параметров.

Систему статических параметров транзисторов строят таким образом, чтобы для характеристики транзистора в каждой из областей работы использовать минимальное количество параметров.

Единственным статическим параметром для характеристики активной области является статический коэффициент передачи тока:

$$B_{ст} = \frac{I_k - I_{к0}}{I_b - I_{к0}}. \quad (3.1)$$

Параметр  $B_{ст}$  определяется, как правило, при небольшом значении напряжения на коллекторе, и при токе коллектора, близком к рабочему значению.

Учет обратного тока в числителе и знаменателе выражения существенен только для микрорежимов, когда  $I_b < 20 I_{к0}$ .

Для характеристики активной области режимов достаточен только один параметр, потому что ветви выходных характеристик в активном режиме можно в самом первом приближении принять горизонтальными, а зависимость  $B_{ст}$  от тока коллектора пренебречь. Тогда численного значения  $B_{ст}$  достаточно для определения положения рабочей точки при известном значении базового тока. Уточнение, если оно необходимо, производят по типовым статическим характеристикам.

Для характеристики области насыщения используют параметры  $U_{к.нас}$  и  $U_{б.нас}$ .

$U_{к.нас}$  – напряжение коллектор–эмиттер в режиме насыщения. Режим насыщения фиксируется при заданном токе коллектора  $I_k$  (близком к рабочему) и при фиксированном токе базы, величина которого должна быть в  $n$  раз больше тока базы, соответствующего заданному току коллектора в активном режиме, т. е.

$$I_b = n \frac{I_k}{\beta_{ст}} . \quad (3.2)$$

Величину  $n$  называют коэффициентом насыщения и выбирают обычно в пределах от 2 до 20.

Коэффициент насыщения  $n$  можно просто определить, если исходные характеристики обладают четко выраженным изломом при переходе из активного режима в режим насыщения. В этом случае величину  $\beta_{ст}$  для использования в формуле (3.2) измеряют в активном режиме в непосредственной близости от точки излома.

Иногда вместо параметра  $U_{к.нас}$  вводят эквивалентный параметр сопротивления насыщения  $r_{нас}$ :

$$r_{нас} = \frac{U_{к.нас}}{I_k} . \quad (3.3)$$

Статические параметры других областей режимов в данной работе не рассматриваются.

### 3.5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

#### 3.5.1. Подготовка прибора к работе

3.5.1.1. Перед сменой испытуемого полупроводникового прибора, перед коммутацией ручек источника питания коллектора и генератора ступенек переведите ключ ВЫБОР ТРАНЗИСТОРА в положение ОТКЛ.

3.5.1.2. Перед началом измерения устанавливайте ручки переключателей ВЕРТИКАЛЬ и ГОРИЗОНТАЛЬ на менее чувствительные шкалы. Ручку АМПЛИТУДА СТУПЕНЕК устанавливайте на минимальную амплитуду, ручку РЕГУЛИРОВКА НАПРЯЖЕНИЯ устанавливайте на 0 %.

3.5.1.3. Перед началом измерения проверьте соответствие положения переключателя МАКСИМАЛЬНАЯ ПИКОВАЯ МОЩНОСТЬ допустимой мощности испытуемого полупроводникового прибора. Будьте особенно внимательны при использовании максимальной пиковой мощности 75 Вт и более. Помните, что продолжительность непрерывной работы прибора при максимальной пиковой мощности 75 Вт и более в режиме обычных ступенек ограничена 30 мин.

3.5.1.4. Будьте внимательны при использовании тока ступенек 100 мА/ступ и 200 мА/ступ. Помните, что суммарный ток усилителя ступенек (смещение плюс ступени) не должен превышать 2 А. При фиксированном значении 2 В/ступ ток нагрузки не должен быть более 20 мА.

3.5.1.5. Продолжительность непрерывной работы при суммарном токе усилителя ступенек (в режиме обычных ступенек) 2 А ограничена 30 мин.

3.5.1.6. После включения и прогрева прибора нажмите кнопку СТУПЕНИ ОДНОКРАТНЫЕ (ОДНОКР) для приведения триггеров генератора ступенек в исходное состояние.

Не допускайте ухода изображения за пределы экрана ЭЛТ в положении НОРМ. переключателя МНОЖИТЕЛЬ (МНОЖ). При необходимости увеличения максимального пикового напряжения сначала переведите переключатель ГОРИЗОНТАЛЬ на менее чувствительную шкалу. При необходимости увеличения максимальной пиковой мощности и амплитуды ступенек сначала переведите переключатель ВЕРТИКАЛЬ на менее чувствительную шкалу.

3.5.2. Порядок наблюдения характеристик диодов и стабилитронов.

3.5.2.1. Установите переключатель ГОРИЗОНТАЛЬ в положение 0,1 V /дел – КОЛЛЕКТОР. Установите в контактное устройство диод (стабилитрон) так, чтобы его катод был соединен с гнездом эмиттера.

3.5.2.2. Переведите ключ ВЫБОР ТРАНЗИСТОРА в положение ПРАВЫЙ. Введите ручку РЕГУЛИРОВКА НАПРЯЖЕНИЯ до появления на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) прямой ветви вольт-амперной характеристики диода (рис. 3.5).

3.5.2.3. Определите  $U_{пр}$  – прямое падение напряжения (значение прямого тока  $I_{пр}$  задается преподавателем).

3.5.2.4. Переведите переключатель ПОЛЯРНОСТЬ в положение (PNP). На экране должно появиться изображение обратной ветви характеристики диода (рис. 3.5).



Рис. 3.5. ВАХ диода (стабилитрона)

3.5.3. Порядок наблюдения характеристик биполярных транзисторов.

3.5.3.1. Ключ ВЫБОР ТРАНЗИСТОРА установите в положение ОТКЛ.

Нажмите кнопку НУЛЬ и установите пятно в нуль масштабной сетки.

3.5.3.2. Установите переключатель ПОЛЯРНОСТЬ в положение, соответствующее типу исследуемого прибора.

3.5.3.3. Установите исследуемый полупроводниковый прибор в выбранное контактное устройство и установите контактное устройство на плату блока испытания.

3.5.3.4. В зависимости от наблюдаемой характеристики установите переключатели ВЕРТИКАЛЬ, ГОРИЗОНТАЛЬ, РЕЖИМ и переключатель селектора выводов в соответствующие положения согласно табл. 3.1.

Таблица 3.1

Положения переключателей для различных схем

Величина, измеряемая по вертикали	Величина, измеряемая по горизонтали	Схема включения транзистора	Положение переключателей			
			ВЕРТИКАЛЬ	ГОРИЗОНТАЛЬ	СЕЛЕКТОР ВЫВОДОВ	РЕЖИМ
$I_k$	$U_{к.э}$	ОЭ	Любое, кроме ГСТ	КОЛЛЕКТОР	БАЗА-ГЕНЕРАТОР	НОРМ
$I_k$	$U_{б.э}$	ОЭ	Любое, кроме ГСТ	БАЗА	БАЗА-ГЕНЕРАТОР	НОРМ
$I_k$	$I_b$	ОЭ	Любое, кроме ГСТ	ГСТ	БАЗА-ГЕНЕРАТОР	НОРМ
$I_k$	$U_{к.б}$	ОБ	Любое, кроме ГСТ	КОЛЛЕКТОР	ЭМИТТЕР-ГЕНЕРАТОР	НОРМ
$I_k$	$U_{э.б}$	ОБ	Любое, кроме ГСТ	БАЗА	ЭМИТТЕР-ГЕНЕРАТОР	НОРМ
$I_b$	$U_{к.э}$	ОБ	ГСТ	КОЛЛЕКТОР	БАЗА-ГЕНЕРАТОР	НОРМ
$I_b$	$U_{к.э}$	ОЭ	ГСТ	БАЗА	БАЗА-ГЕНЕРАТОР	НОРМ
$I_b$	$U_{к.б}$	ОБ	ГСТ	КОЛЛЕКТОР	ЭМИТТЕР-ГЕНЕРАТОР	НОРМ

3.5.3.5. Наблюдение семейства выходных характеристик для схемы с общим эмиттером (ОЭ)  $I_K = f(U_{KЭ})$ .

Схема соединения испытуемого транзистора с отдельными элементами схемы прибора и примерный вид получаемого на экране изображения семейства выходных характеристик показаны на рис. 3.6.

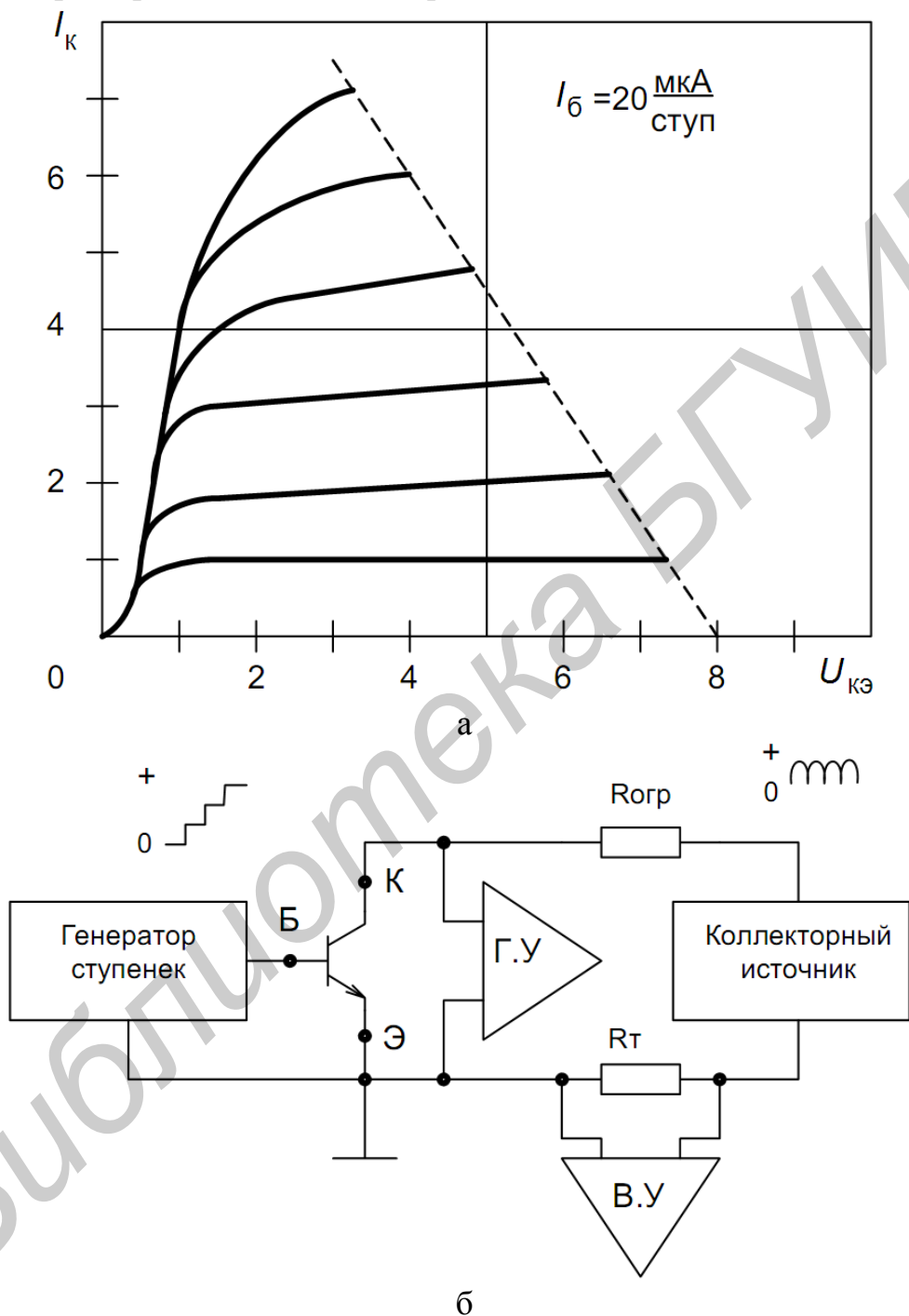


Рис. 3.6. Исследование выходных характеристик транзистора в схеме с ОЭ:

а – вид характеристик; б – схема с ОЭ;  
 ГУ – горизонтальный усилитель; ВУ – вертикальный усилитель;  
 $R_T$  – токочувствительный резистор

Для получения характеристики, удобной для анализа:

а) переключателями ВЕРТИКАЛЬ и ГОРИЗОНТАЛЬ установите масштаб измерения  $I_k$  по вертикали и  $U_{кб}$  по горизонтали, исходя из предполагаемых максимальных величин. Так, например, при ожидаемом максимальном токе коллектора 8 мА переключатель ВЕРТИКАЛЬ необходимо поставить в положение 1мА/дел, что будет соответствовать току в 8 мА на всю шкалу. Если на коллектор будет подано максимальное напряжение 10 В, то переключатель ГОРИЗОНТАЛЬ необходимо поставить в положение 1 В/дел-коллектор, что соответствует 10 В на всю шкалу;

б) переключатель МАКСИМАЛЬНАЯ ПИКОВАЯ МОЩНОСТЬ установите в положение, чтобы режим транзистора по мощности не превышал предельно допустимого;

в) ручкой РЕГУЛИРОВКА НАПРЯЖЕНИЯ установите необходимое максимальное коллекторное напряжение;

г) ключом ВЫБОР ТРАНЗИСТОРА подключите испытуемый транзистор;

д) переключателями АМПЛИТУДА СТУПЕНЕК и КОЛИЧЕСТВО СТУПЕНЕК постепенно увеличивайте ток базы до такого предела, чтобы характеристики не выходили за пределы шкалы экрана. При этом, например, если переключатель АМПЛИТУДА СТУПЕНЕК установлен в положение 0,05 мА/ступ, то первая характеристика прочерчена при токе базы, равном 0 мА, вторая – 0,05 мА, третья – 0,1 мА и т. д.

3.5.3.6. Наблюдение семейства выходных характеристик для схем с общей базой (ОБ)  $I_k = f(U_{кб})$ .

Схема включения и вид характеристик показаны на рис. 3.7 – 3.9.

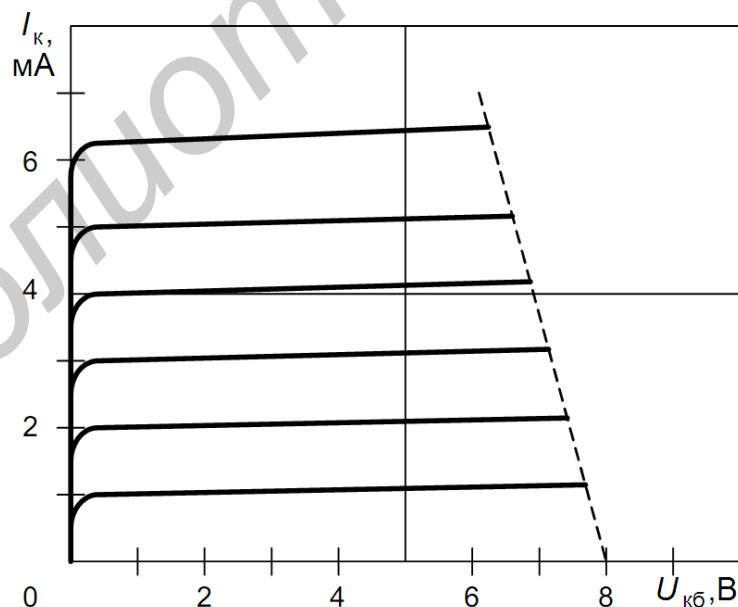


Рис. 3.7. Исследование выходных характеристик транзистора в схеме с ОБ:  
вид характеристик



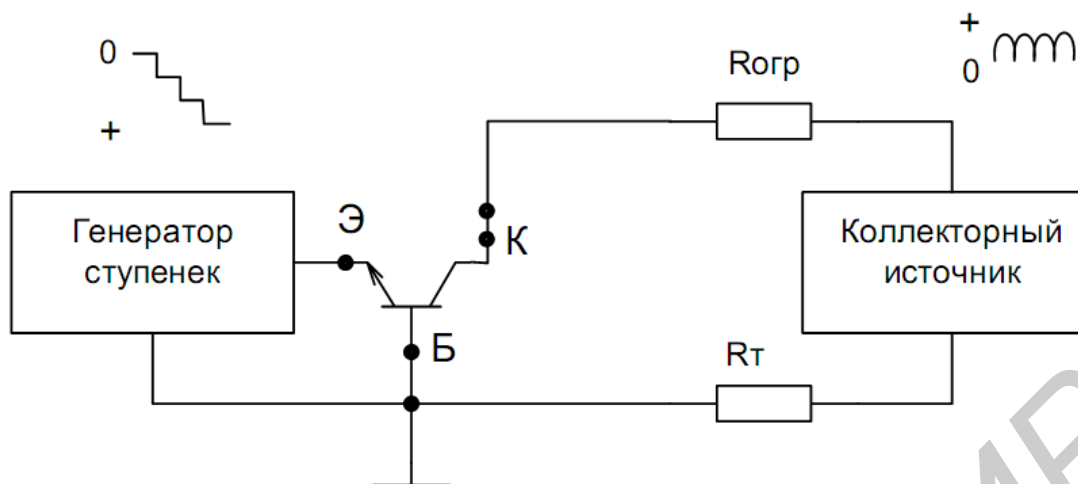


Рис. 3.8. Исследование выходных характеристик транзистора в схеме с ОБ:  
схема установки с ОБ

3.5.3.7. Наблюдение входных характеристик транзистора для схемы с ОЭ,  
 $I_{\text{б}} = f(U_{\text{бэ}})$ .

Установите ключ ВЫБОР ТРАНЗИСТОРА в положение ОТКЛ, установите переключатель ВЕРТИКАЛЬ в положение ГСТ, а переключатель ГОРИЗОНТАЛЬ – в положение 0,1 V/дел – БАЗА.

Примерный вид характеристики приведен на рис. 3.9.

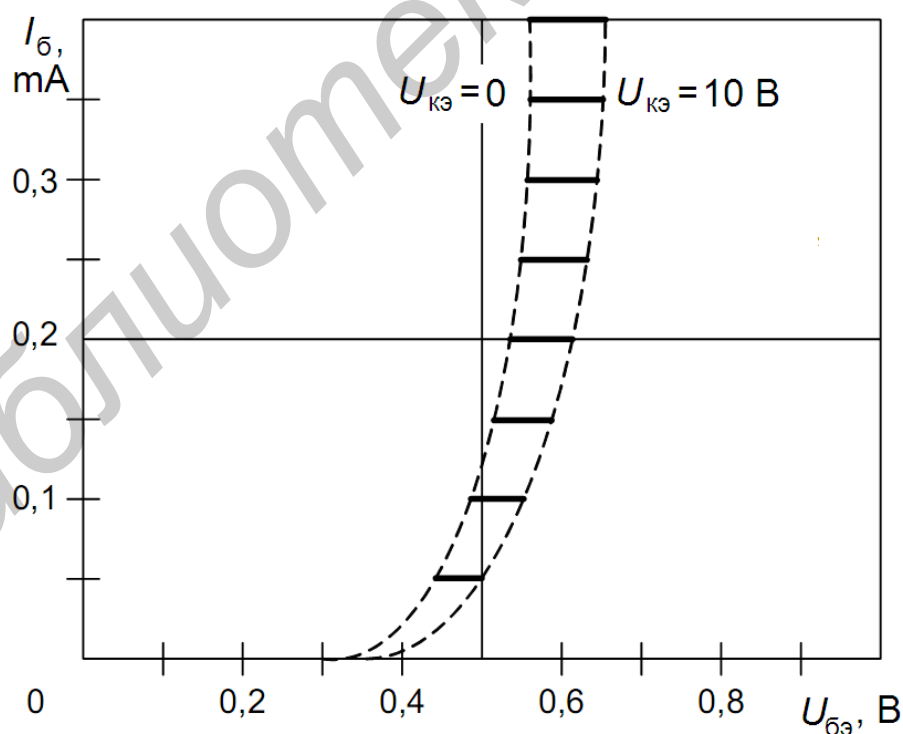


Рис. 3.9. Исследование входных характеристик транзистора в схеме с ОЭ:  
вид характеристик

Характеристика представляет собой огибающую семейства горизонтальных прямых для заданного  $U_{кэ}$ . Масштаб тока базы  $I_b$ , измеряемого по вертикали, соответствует масштабу ступенек тока.

3.5.3.8. Наблюдение характеристики прямой передачи по току для схемы с ОЭ  $I_k = f(I_b)$ .

Примерный вид характеристики приведен на рис. 3.10. Характеристика представляет собой огибающую семейства вертикальных прямых для заданного  $U_{кэ}$ . Масштаб тока базы  $I_b$ , измеряемого по горизонтали, соответствует масштабу ступенек тока.

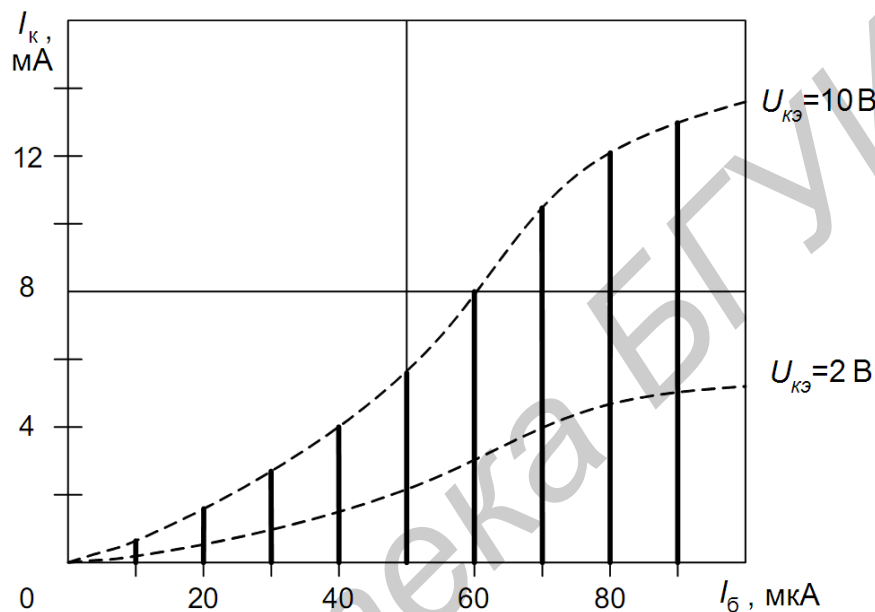


Рис. 3.10. Вид характеристик прямой передачи по току транзистора в схеме с ОЭ ( $U_{кэ}$  – параметр)

### 3.6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

3.6.1. Описание плана работы.

3.6.2. Структурная схема прибора для наблюдения характеристик транзисторов (ПНХТ).

3.6.3. Характеристики диода или стабилитрона.

3.6.4. Семейство характеристик биполярных транзисторов, включенных по схеме ОБ.

3.6.5. Семейство характеристик биполярных транзисторов, включенных по схеме ОЭ.

## Лабораторная работа №4

### Исследование вольт-амперных характеристик транзисторов с использованием измерителя параметров полупроводниковых приборов ИППП-1

#### 4.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследовать вольт-амперные характеристики диодов и транзисторов с использованием измерителя параметров полупроводниковых приборов ИППП-1.

#### 4.2. ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ:

- 1) измеритель параметров полупроводниковых приборов ИППП-1;
- 2) ППЭВМ типа IBM/PC;
- 3) программное обеспечение (ПО) «LIDER».

#### 4.3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Измеритель параметров полупроводниковых приборов ИППП-1 (рис. 4.1) предназначен для контроля и исследований вольт-амперных характеристик (ВАХ) электронных компонентов путём их визуального наблюдения на экране ПК в виде графиков или таблиц, расчёта на их основе стандартных параметров исследуемого объекта и отображения функциональных зависимостей этих параметров, запоминания и документирования результатов измерений.



Рис. 4.1. Внешний вид прибора ИППП-1

Измеритель ИППП-1 содержит:

- 1) от одного до четырех источников-измерителей однопроводных (ИИО) или
- 2) от 2-х до 4-х источников-измерителей двухпроводных (ИИД);
- 3) устройство, контактирующее УК (для подключения тестируемых элементов в корпусе с выводами);
- 4) кабели и контакт-зажимы;
- 5) ПО «LIDER».

ПО «LIDER» предназначена для управления процессом измерения, отображения, сохранения, а также расчета и проверки на допусковый контроль параметров полупроводниковых приборов. ПО «LIDER» функционирует на базе ОС Windows 98/2000/XP и представляет собой законченный исполняемый

модуль, обеспечивающий управление прибором ИППП-1 в интерактивном и автоматическом режимах.

ПО «LIDER» при совместной работе с техническими средствами решает следующие основные задачи:

- определение конфигурации (поиск физического подключения прибора по интерфейсу RS 232, запрос заводского номера и определение количества ИИ в данной конфигурации; загрузку калибровочных коэффициентов);
- контроль правильности передачи информации с верхнего уровня в прибор и обратно;
- настройку и контроль параметров измерения;
- проведение измерений;
- расчет параметров (например, расчёт значения функции по значению аргумента или значения аргумента по значению функции методом линейной аппроксимации, расчёт сопротивления, крутизны характеристики, расчёт  $Beta$ ,  $Beta_i$ , нахождение максимума, напряжения Эрли и др.);
- проверка на допусковый контроль рассчитываемых параметров;
- отображение результатов измерения в виде графика и соответствующей таблицы;
- формирование отчета по результатам проведения измерения, расчета и контроля с указанием признака годности параметров;
- сохранение графиков, таблиц и отчетов в электронном виде;
- обновление (добавление, удаление, копирование) списка тестов для проведения измерений;
- добавление и обновление библиотек стандартных и пользовательских тестов.

ПО «LIDER» представляет собой многооконный интерфейс пользователя, обеспечивающий широкие возможности по заданию и корректировке параметров вышеуказанных процессов, а также отображение измеренных и/или рассчитываемых характеристик в виде графиков с полной легендой и соответствующих им таблиц на экране монитора с предоставлением возможности их сохранения в электронном виде. Сохранение графиков производится в формате BMP, сохранение таблиц – в текстовом формате с элементами табуляции. Полученные в результате расчёта значения параметров проверяются на допусковый контроль и отображаются в виде отчета на экране монитора с индикацией годности. По желанию пользователя полученный отчет сохраняется в электронном виде в текстовом формате.

ПО «LIDER» включает компоненты, приведенные в табл. 4.1.

Перечень файлов параметров стандартных тестов, предоставляемых пользователю, приведен в табл. 4.2.

## Состав программного обеспечения

Имя файла	Назначение
Lider.exe	Исполняемый модуль
Psw\<имя>.psw	Паспортный файл, где <имя> – заводской номер прибора
Tst\Tst_standart\<имя>.tst	Файлы параметров стандартных тестов, где <имя> – наименование соответствующего теста
Tst\Tst_user\<имя>.tst	Файлы параметров пользовательских тестов, где <имя> – наименование соответствующего теста. Файлы создаются пользователем
Certif.mod	Файл модели измерения для проверки и калибровки прибора
Lider.mod	Файл модели измерения, содержащий перечень стандартных тестов полупроводниковых приборов
Demo.mod	Демонстрационный файл модели измерения

Перечень файлов параметров стандартных тестов.  
Двухполюсники

	Имя файла. Краткое описание теста	Наименование исследуемого объекта	Наименование выводов	Измеряемые характеристики, пределы измерений	Ось X	Ось Y1, Y2	Выводимые параметры
1	<b>Forvard.tst</b> ВАХ в прямом включении перехода	Диод (стабилитрон, варикап)	A – анод; K – катод	$I_a = F(U_{a \text{ прям}})$ при $U_{a \text{ прям}}$ от 0 до 1 В, ограничение по $I \leq 10 \text{ мА}$	LIN LIN	LIN LOG	$U_{\text{прям}}$ при $I_a = 10 \text{ мкА}$ . $I_{\text{прям}}$ при $U_{a \text{ прям}} = 1 \text{ В}$
2	<b>Reverse.tst</b> ВАХ в обратном включении перехода			$I_a = F(U_{a \text{ обрат}})$ при $U_{a \text{ обрат}}$ от 0 до – 50 В, ограничение по $I \leq 20 \text{ мкА}$	LIN LIN	LIN LOG	$U_{\text{обрат}}$ при $I_a = 10 \text{ мкА}$ . $I_{\text{утеч}}$ при $U_{a \text{ обрат}} =$ – 20 В
3	<b>Res.tst</b>  ВАХ резистора	Резистор (цепочка контактов)	A – измеряе- мый электрод; B – опорный электрод	$I_a = F(U_a)$ при $U_a$ от –0,5 до +0,5 В, ограничение по $I \leq 20 \text{ мА}$ . Расчет $R = U_a / I_a =$ $= F(U_a)$	LIN	LIN - Y1 LIN - Y2	$R$ при $U_a =$ $= 0,2 \text{ В}$
4	<b>Cap.tst</b>  Утечка конденсатора	Конденсатор	A – измеряе- мый электрод; B – опорный электрод	$I_a = F(U_a)$ при $U_a$ от 0 до $\pm 100 \text{ В}$ , ограничение по $I \leq 200 \text{ нА}$	LIN LIN	LIN LOG	$I_{\text{утеч}}$ при $U_a = 20 \text{ В}$ . $U_{\text{проб}}$ при $I_a = 0,1 \text{ мкА}$

## Трёхполюсники

	Имя файла. Краткое описание теста	Наименование исследуемого объекта	Наименование выводов	Измеряемые характеристики, пределы измерений	Ось X	Ось Y1, Y2	Выводимые параметры
5	<b>Beta.tst</b> Зависимость $\beta$ от тока базы в прямом включении	Биполярный транзистор <i>NPN (PNP)</i> . Полярность напряжений приведена для <i>NPN</i> транзистора	Е – эмиттер; В – база; С – коллектор	$I_k = F(I_b)$ при $I_b$ от 1 нА до 1 мА, $U_k = 1$ и 5 В, $U_s = 0$ В. Расчет $Beta = I_k / I_b = F(I_b)$		LOG	LOG - Y1 LIN - Y2 Beta max, $I_b$ при Beta max, Beta при $I_b = 10$ мкА
6	<b>Betai.tst</b> Зависимость $\beta$ от тока базы в инверсном включении			$I_s = F(I_b)$ При $I_b$ от 1 нА до 10 мА, $U_s = 1$ и 3 В, $U_k = 0$ В. Расчет $Beta = I_s / I_b = F(I_b)$		LOG	LOG - Y1 LIN - Y2 Beta <sub>i</sub> max, $I_b$ при Beta <sub>i</sub> max, Beta <sub>i</sub> при $I_b = 10$ мкА

Продолжение табл. 4.2

	Имя файла. Краткое описание теста	Наименование исследуемого объекта	Наименование выводов	Измеряемые характеристики, пределы измерений	Ось X	Ось Y1, Y2	Выводимые параметры
7	<b>Vce_for.tst</b> Пробивное напряжение коллектор-эмиттер в прямом включении			$I_K = F(U_K)$ при $U_3 = 0$ В, база в обрыве ( $I_6 = 0$ ), $U_K$ от 0 до 50 В, $I_K \leq 20$ мкА	LIN	LIN	$U_{K.э}$ прямое при $I_K = 10$ мкА
8	<b>Vce_rev.tst</b> Пробивное напряжение коллектор-эмиттер в инверсном включении			$I_K = F(U_K)$ при $U_3 = 0$ В, база в обрыве ( $I_6 = 0$ ), $U_K$ от 0 до -10 В (для <i>PNP</i> до +50 В), $I_K \leq 20$ мкА	LIN	LIN	$U_{K.э}$ обратное при $I_K = 10$ мкА
9	<b>IcVc.tst</b> Выходная характеристика транзистора			$I_K = F(U_K)$ при $U_3 = 0$ В, $I_6$ от 1 до 10 мкА (для <i>PNP</i> от -10 до -100 мкА), 10 шагов, $U_K$ от 0 до 10 В, $I_K \leq 50$ мА	LIN	LIN	$I_K$ при $U_K = 5$ В, $I_6 = I_6 \text{ max}$ , напряжение Эрли при $U_K =$ $= 5$ В, $I_K = 1$ мА



Продолжение табл. 4.2

	Имя файла. Краткое описание теста	Наименование исследуемого объекта	Наименование выводов	Измеряемые характеристики, пределы измерений	Ось X	Ось Y1, Y2	Выводимые параметры
10	<b>Ibe.tst</b> Эмиссионная способность эмиттера			$I_6 = F(U_6)$ при $U_6$ от 0,4 до 1,1 В, $U_3 = 0$ В, коллектор в обрыве	LIN	LOG	Вид характеристики
11	<b>Vcb_for.tst</b> Прямое напряжение перехода база- коллектор			$I_k = F(U_k)$ при $U_6 = 0$ В, эмиттер в обрыве ( $I_3 = 0$ ), $U_k$ от 0 до – 1 В, $I_k \leq 20$ мкА	LIN	LIN	$U_{к.б}$ прямое при $I_k = 10$ мкА
12	<b>Vbe_for.tst</b> Прямое напряжение перехода база- эмиттер			$I_6 = F(U_6)$ при $U_3 = 0$ В, коллектор в обрыве ( $I_k = 0$ ), $U_6$ от 0 до 1 В, $I_6 \leq 20$ мкА	LIN	LIN	$U_{б.э}$ прямое при $I_6 = 10$ мкА
13	<b>Vcb_rev.tst</b> Пробивное напряжение перехода база- коллектор			$I_k = F(U_k)$ при $U_6 = 0$ В, эмиттер в обрыве ( $I_3 = 0$ ), $U_k$ от 0 до 50 В, $I_k \leq 20$ мкА	LIN	LIN	$U_{к.б}$ обратное при $I_k = 10$ мкА
14	<b>Vbe_rev.tst</b> Пробивное напряжение перехода база- эмиттер			$I_6 = F(U_6)$ при $U_3 = 0$ В, коллектор в обрыве ( $I_k = 0$ ), $U_6$ от 0 до –10 В (для PNP от 0 до +50 В), $I_6 \leq 20$ мкА	LIN	LIN	$U_{б.э}$ обратное при $I_6 = 10$ мкА

Продолжение табл. 4.2

	Имя файла. Краткое описание теста	Наименование исследуемого объекта	Наименование выводов	Измеряемые характеристики, пределы измерений	Ось X	Ось Y1, Y2	Выводимые параметры
15	<b>IdVg.tst</b> Допороговая характеристика в диодном включении	МОП транзистор. <i>NMOS</i> ( <i>PMOS</i> ). Полярность напряжений приведена для <i>NMOS</i> транзистора	G – затвор; D – сток; S – исток	$I_d = F(U_g)$ при $U_s = 0$ В, $U_d = U_g$ от 0 до 2 В, $I_d \leq 100$ мА	LIN	LOG	$V_{th}$ (порог) при $I_d = 0,1$ мкА
16	<b>IdVd.tst</b>  Выходная характеристика			$I_d = F(U_d)$ при $U_s = 0$ В, $U_d$ от 0 до 10 В, $U_g$ от 0 до 5 В, 6 шагов, $I_d \leq 100$ мА	LIN	LIN	$I_d$ при $U_d = U_g =$ $= 3$ В $I_d$ при $U_d = U_g =$ $= 5$ В
17	<b>Vd_break.tst</b> Пробивное напряжение стока			$I_d = F(U_d)$ при $U_s = U_g = 0$ В, $U_d$ от 0 до 30 В, $I_d \leq 20$ мкА	LIN	LIN	$U_d$ пробоя При $I_d = 10$ мкА
18	<b>Vg_break.tst</b> Пробивное напряжение затвора			$I_g = F(U_g)$ при $U_s = U_d = 0$ В, $U_g$ от 0 до 50 В, $I_g \leq 200$ нА	LIN	LIN	$U_g$ пробоя при $I_g = 0,1$ мкА

## Четырехполюсники

	Имя файла. Краткое описание теста	Наименование исследуемого объекта	Наименование выводов	Измеряемые характеристики, пределы измерений	Ось X	Ось Y1, Y2	Выводимые параметры
19	<b>Vcs_for.tst</b> Прямое напряжение коллектор- подложка	Биполярный транзистор <i>NPN (PNP)</i>	Е – эмиттер; В – база; С – коллектор; S – подложка	$I_k = F(U_k)$ при $U_{\pi} = 0$ В, эмиттер и база в обрыве ( $I_3 = 0$ , $I_6 = 0$ ), $U_k$ от 0 до –1 В, $I_k \leq 20$ мкА	LIN	LIN	$U_{кп}$ прямое при $I_k = 10$ мкА
20	<b>Vcs_rev.tst</b> Обратное напряжение коллектор- подложка			$I_k = F(U_k)$ при $U_{\pi} = 0$ В, эмиттер и база в обрыве ( $I_3 = 0$ , $I_6 = 0$ ), $U_k$ от 0 до 100 В, $I_k \leq 20$ мкА	LIN	LIN	$U_{кп}$ обратное при $I_k = 10$ мкА
21	<b>Vbs_for.tst</b> Прямое напряжение база-подложка			$I_6 = F(U_6)$ при $U_{\pi} = 0$ В, эмиттер и коллектор в обрыве ( $I_3 = 0$ , $I_k = 0$ ), $U_6$ от 0 до +100 В (для <i>PNP</i> от 0 до –1 В), $I_6 \leq 20$ мкА	LIN	LIN	$U_{кп}$ прямое при $I_6 = 10$ мкА

	Имя файла. Краткое описание теста	Наименование исследуемого объекта	Наименование выводов	Измеряемые характеристики, пределы измерений	Ось X	Ось Y1, Y2	Выводимые параметры
22	<b>Vbs_rev.tst</b> Обратное напряжение база-подложка			$I_6 = F(U_6)$ при $U_n = 0$ В, эмиттер и коллектор в обрыве ( $I_3 = 0$ , $I_k = 0$ ), $U_6$ от 0 до - 100 В (для PNP от 0 до 100 В), $I_6 \leq 20$ мкА	LIN	LIN	$U_{6п}$ обратное при $I_6 = 10$ мкА
23	<b>IdVg_b.tst</b> Зависимость порогового напряжения от смещения на кармане	МОП транзистор NMOS (PMOS)	G – затвор; D – сток; S – исток; B – карман	$I_d = F(U_g)$ при $U_s = 0$ В, $U_d = 0,1$ В, $U_g$ от 0 до 5 В, $U_b$ от 0 до -6 В, 7 шагов, $I_d \leq 100$ мА	LIN	LOG	$V_{th}$ (порог) при $I_d =$ $= 0,1$ мкА при разных смещениях на кармане
24	<b>IbVg_b.tst</b>  Ток подложки			$I_b = F(U_g)$ при $U_s = 0$ В, $U_d = 5$ и 7 В, $U_g$ от 0 до 7 В, $U_b = 0$ В	LIN	LIN	$I_b$ max при разных смещениях на стоке

Файл модели измерения формируется пользователем (инженером-технологом) для каждого тестируемого изделия (пластины) из стандартных и пользовательских тестов и имеет следующую иерархическую структуру:

- 1-й уровень – тестовый модуль;
- 2-й уровень – элемент;
- 3-й уровень – тест.

В файле модели измерения сохраняются параметры измерения всех тестов, содержащихся в списке данной модели измерения, а также результаты последних проведенных измерений по каждому тесту. Каждый файл модели измерения может содержать не более 16 тестовых модулей. Каждый тестовый модуль может включать не более 50 тестируемых элементов. Для каждого элемента можно ввести не более 20 тестов.

При выборе пользователем 3-го уровня в дереве загруженной модели измерения (дерево располагается в левой части главного окна приложения (см. рис. 4.2)) производится запуск измерения указанного теста, при выборе 2-го уровня – производится автоматический запуск измерения всех тестов указанного элемента. В последнем случае запуск очередного теста осуществляется либо автоматически (указан вид запуска – «С передней панели»), нажатием кнопки «Пуск» на приборе (указан вид запуска – Кнопка «Пуск»), либо внешним сигналом (указан вид запуска – «Внешний сигнал»).

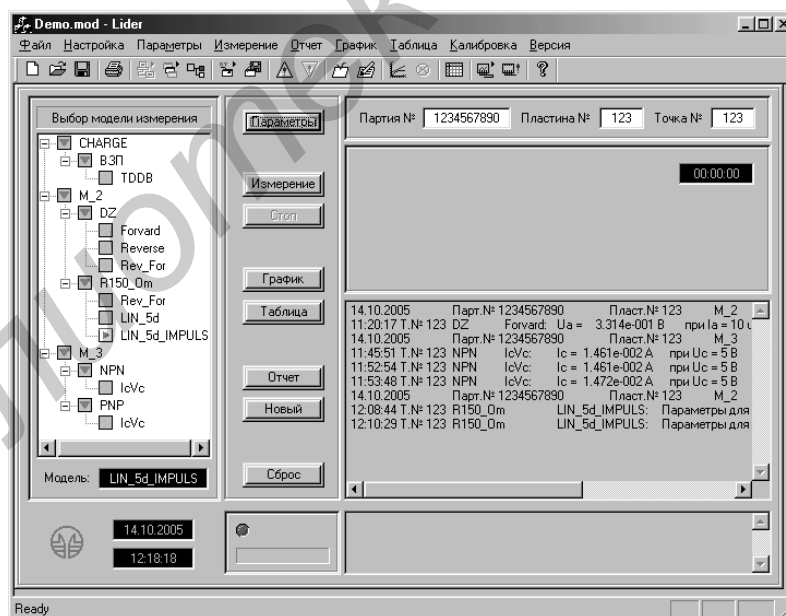


Рис. 4.2. Главное окно приложения

В правой части главного окна приложения отображается отчет.

Первая строка отчета имеет следующую структуру:

<ДАТА>\t <ПАРТИЯ №>\t<ПЛАСТИНА №>\t <МОДУЛЬ>\n

- где
- <ДАТА> – дата проведения измерения;
  - <ПАРТИЯ №> – номер партии тестируемого изделия;

- <ПЛАСТИНА №> – номер пластины;
- <МОДУЛЬ> – наименование тестового модуля.

Эта строка проставляется в отчете всякий раз при изменении либо даты, либо номера партии, либо номера пластины, либо при изменении тестового модуля.

Каждая очередная строка отчета формируется после выполнения очередного теста и имеет следующую структуру:

<ВРЕМЯ>\t<ТОЧКА>\t<ЭЛЕМЕНТ>\t<ТЕСТ><:;>\t<ПАРАМЕТР 1[\tПАРАМЕТР 2] >\n

где – <ВРЕМЯ> – время измерения;

– <ТОЧКА> – номер контрольной точки, введенный пользователем;


– <ЭЛЕМЕНТ> – наименование тестируемого элемента;

– <ТЕСТ> – наименование выполненного теста;

– <ПАРАМЕТР 1 [ПАРАМЕТР 2]> – значение искомого параметра 1 (параметра 2) с указанием признака годности (значок (\*)) – если не годен), если допусковой контроль проводился в следующем виде:

<ПАРАМЕТР> = <значение> [<признак годности>] при <аргумент> = <значение>

**Пример:**  $I_k = 0.345 \text{ mA} (*)$  при  $U_k = 1 \text{ V}$ .

Настройка параметров измерения осуществляется по нажатию кнопки  (**Параметры**) главного окна приложения после выбора нужного теста в дереве модели измерения (см. рис. 4.3). Последовательно переключая закладки, пользователь производит ввод новых либо корректировку существующих параметров выбранного теста.

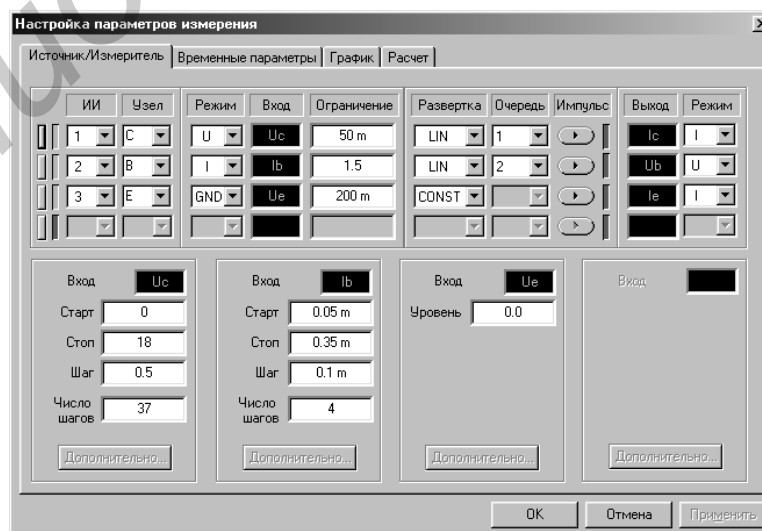


Рис. 4.3. Режим «Настройка параметров измерения» (Закладка «Источник/Измеритель»)

Вид развёртки может быть задан любым из перечисленных ниже:

- CONST – постоянный уровень;
- LIN – линейная развёртка;
- LOG – логарифмическая развёртка;
- LIST – развёртка задаётся списком (от 1 до 10 значений);
- SINC – развёртка синхронная с развёрткой, указанной в качестве эталонной;
- TIME – развёртка во временной области.

На закладке «Временные параметры» (см. рис. 4.4) производится задание временных параметров измерения.

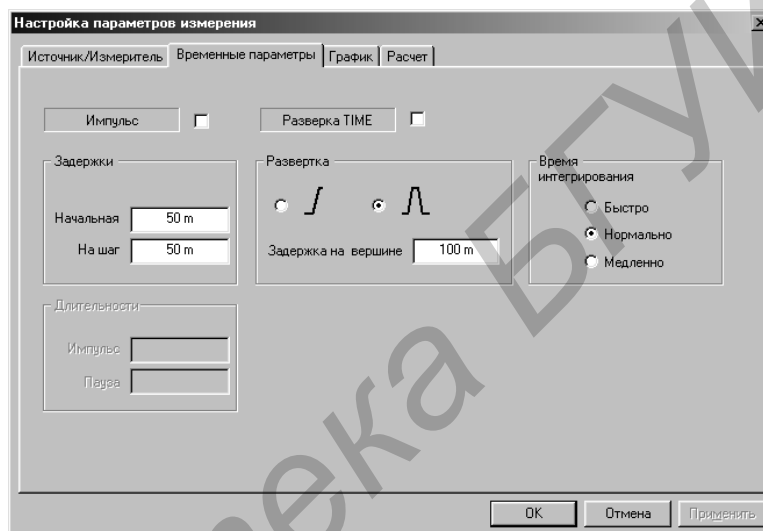


Рис. 4.4. Режим «Настройка параметров измерения» (Закладка «Временные параметры»)

На закладке «График» (см. рис. 4.5) производится задание параметров для отображения измеренных и/или полученных в результате расчёта данных на графике и в таблице соответствующих значений.

В полях для ввода наименований линий по оси Y1 и оси Y2 кроме измеренных данных можно задавать простейшую формулу для отображения на графике данных, полученных в результате расчёта (например,  $I_K/I_B$  (либо Beta) для расчета Beta или  $U_a/I_a$  для расчета R).

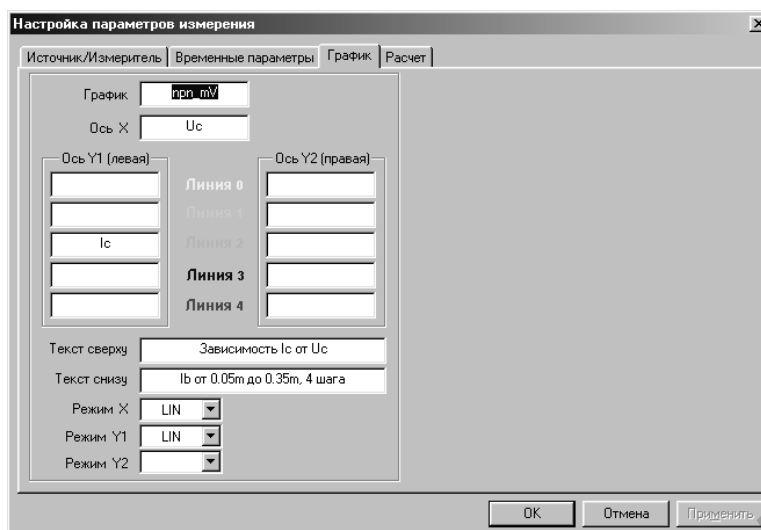


Рис. 4.5. Режим «Настройка параметров измерения» (Закладка «График»)

Режим осей X, Y1, Y2 может быть «LIN» или «LOG».

На закладке «Расчёт» (см. рис. 4.6) задают условия для расчета параметров. Расчет искомых параметров и проверка их на допусковый контроль производится автоматически после окончания измерений.

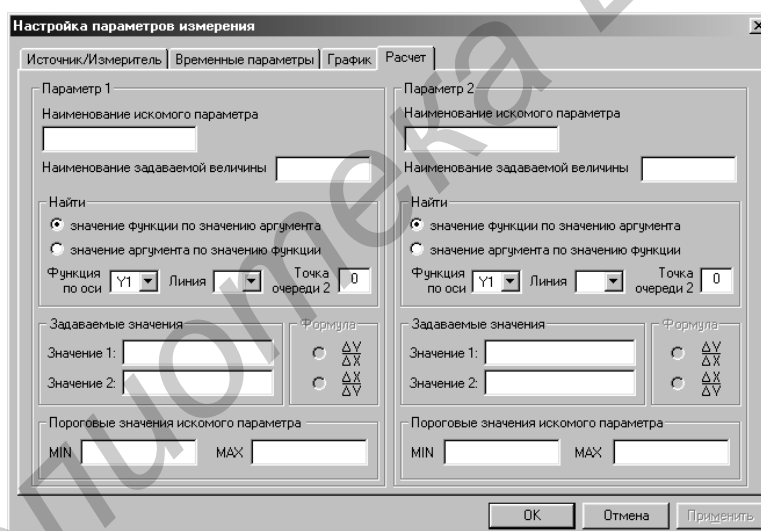


Рис. 4.6. Режим «Настройка параметров измерения» (Закладка «Расчет»)

После проведения измерения результаты измерения можно просмотреть на графике и в соответствующей таблице.

На графике отображается дата и время проведения измерения (в верхнем правом углу), надпись сверху и надпись снизу, задаваемые пользователем в режиме «Настройка параметров измерения» на закладке «График», а также полная легенда по оси Y1 (слева) и по оси Y2 (справа). Оцифровка осей производится автоматически с подбором оптимального числа делений сетки.

В режиме «График» ПО «LIDER» предоставляет пользователю следующие возможности:



- отображать или не отображать сетку по оси X, по оси Y1 и Y2;
- изменить в линейном режиме минимальное и максимальное значения по осям X, Y1, Y2, что позволяет детализировать (увеличить) интересующий участок графика;
- изменить цвет фона, шрифта, сетки, касательной ;
- сохранить график в электронном виде в формате BMP;
- рассчитать напряжение Эрли методом построения касательной к графику. Реализуется следующим образом: пользователь с помощью курсора на экране монитора указывает две точки на графике при нажатой правой кнопке мыши, тем самым выделяя прямоугольник, диагональ которого задаёт наклон касательной к графику на интересующем участке. Значение напряжения Эрли рассчитывается как значение аргумента в точке пересечения касательной с осью X, одновременно вычисляется тангенс угла наклона касательной к оси X. Результат расчета отображается в строке под графиком в виде

**Касательная:**  $y1 = 0.0$   $x = \langle \text{значение} \rangle$   $tgA = \langle \text{значение} \rangle$ .

При этом выбор интересующего участка графика путём отсекаания с помощью прямоугольника осуществляет пользователь, визуально оценивая график. Насколько точно были указаны пользователем точки графика, настолько точно будет построена касательная;

- работа с маркером. Пользователь с помощью левой кнопки мыши указывает интересующую точку графика. Точка отмечается маркером в виде красного квадратика и ее координаты отображаются в строке над графиком соответственно по оси X, Y1, Y2 в виде:

**marker:**  $x = \langle \text{значение} \rangle$ ,  $y1 = \langle \text{значение} \rangle$ ,  $y2 = \langle \text{значение} \rangle$

Измеренные и/или полученные в результате расчёта данные можно просмотреть на экране монитора в виде таблицы, которая имеет следующий формат:

КОЛОНКА 1 («Точка») указывает:

$\langle \text{Номер измерения} \rangle \backslash \langle \text{Номер очереди} \rangle \backslash \langle \text{Номер точки в очереди} \rangle$

КОЛОНКА 2 соответствует данным по оси X.

Последующие колонки содержат измеренные и/или полученные в результате расчёта данные, отображаемые по оси Y1 и по оси Y2 (до пяти по каждой оси).

Сохранение таблицы в электронном виде производится в текстовом формате в файл \*.tab, указанный пользователем в ответ на запрос. При этом на экране монитора появляется окно, которое предоставляет возможность пользователю выбрать способ сохранения таблицы (добавление или обновление). При необходимости задаётся фамилия и должность лица, производящего измерение. Сохранение производится с автоматическим

проставлением наименований тестового модуля, элемента и теста, а также даты и времени проведения измерения.

Формат сохранения измеренных данных в файле \*.tab следующий:

1-я строка: <Дата>\t<Время>\t<Заголовок таблицы>\n

2-я строка: <Тестовый модуль>\t<Элемент>\t<Тест>\n

3-я строка: <Надпись сверху>\n

4-я строка: <Надпись снизу>\n

5-я строка: <Измерения проводил ФИО>\t<Должность>\n

6-я строка: <Расчётные значения параметров из отчёта>\n

7-я строка (заголовки колонок):

<Точка>\t<Данные по X>\t<Данные по Y1>[\t<Данные по Y2>]\n

8-я строка (данные): <точка 0>\t<данное 0>\t<данное 0>\t[<данное 0>]\n

...

...

N-я строка (данные): <точка n>\t<данное n>\t<данное n>\t[<данное n>]\n

Формат файлов \*.tab позволяет в дальнейшем анализировать результаты измерения средствами Excel или Statistica.

#### 4.4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

4.4.1. Получить исследуемые приборы: диод и транзистор.

4.4.2. Исследовать интерфейс и порядок работы ПО «LIDER» на основе примеров.

4.4.3. Исследовать указанные преподавателем характеристики приборов.

4.4.4. Записать в виде файлов результаты исследований в графическом и цифровом виде.

4.4.5. На основе исследуемых характеристик рассчитать указанные преподавателем статические параметры приборов.

Все примеры можно удалить из текста практикума, распечатать их отдельно и разместить на каждом рабочем месте.

#### 4.5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

4.5.1. Описание плана работы.

4.5.2. Характеристики диода или стабилитрона в форме распечаток.

4.5.3. Семейство характеристик биполярных транзисторов в форме распечаток.

4.5.4. Расчет статистических параметров.

*Учебное издание*

**Гранько Сергей Владимирович  
Дворников Олег Владимирович**

***ИСПЫТАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ  
ПРИБОРОВ И ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ***

Лабораторный практикум  
по курсу «Полупроводниковые приборы и элементы интегральных микросхем»  
для студентов специальностей  
1-41 01 02 «Микро- и наноэлектронные технологии и системы»,  
1-41 01 03 «Квантовые информационные системы»  
всех форм обучения

Редактор Т. Н. Крюкова  
Корректор Е. Н. Батурчик  
Компьютерная верстка М. В. Гуртатовская

---

Подписано в печать 23.12.2010.	Формат 60x84 1/16.	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. 2,67.
Уч.-изд. л. 2,1.	Тираж 100 экз.	Заказ 139.

---

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.  
220013, Минск, П. Бровки, 6