

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники

М.М. Славникова  
С.А. Артищев

## **ИЗМЕРЕНИЕ ШИРИНЫ БАЗЫ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА**

Методические указания к лабораторному занятию по дисциплине  
«Физические основы микро- и наноэлектроники»

Томск  
2022

УДК 538.915  
ББК 22.35  
С 470

Рецензент

**Еханин С.Г.**, доцент кафедры конструирования узлов и деталей РЭА, доктор физ.-мат. наук

**Славникова Марина Михайловна, Артищев Сергей Александрович**

Измерение ширины базы биполярного транзистора: методические указания к лабораторному занятию по дисциплине «Физические основы микро- и наноэлектроники» / М.М. Славникова, С.А. Артищев. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022. – 7с.

В методических указаниях кратко изложено взаимодействие двух близкорасположенных электронно-дырочных переходов. Показано, что от расстояния между переходами – ширины база – зависит ток коллекторного перехода биполярного транзистора, мощность и максимальная рабочая частота. Приведены методика измерений, порядок выполнения лабораторной работы, контрольные вопросы и список рекомендуемой литературы.

Предназначено для студентов, изучающих курс «Физические основы микро- и наноэлектроники».

Одобрено на заседании каф. КУДР, протокол № 234 от 5 марта 2022 г.

УДК 538.915  
ББК 22.35

© Славникова М.М., 2022  
© Артищев С.А., 2022  
© Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

	Введение.....	4
1	Измерение расстояния между двумя плоскостными P-N переходами – ширины базы.....	4
2	Задание.....	5
3	Справочные данные для расчета ширины базы транзистора.....	6
4	Порядок работы.....	6
5	Контрольные вопросы.....	7
	Список рекомендуемой литературы.....	7

## ВВЕДЕНИЕ

Плоскостной транзистор разработан в 1949 г. Он может с успехом выполнять как усилительные, так и ключевые функции, т.е. представляет собой унифицированный элемент электронных схем.

Плоскостной транзистор является системой двух взаимодействующих  $p-n$  переходов. Непременным условием такого взаимодействия является достаточно малая ширина базы  $W$ . Ширина базы должна быть значительно меньше диффузионной длины неосновных носителей заряда, т.е.  $W \ll L$ .

Характер движения инжектированных эмиттером носителей в базе в общем случае заключается в сочетании диффузии и дрейфа. Электрическое поле, в котором происходит дрейф, может быть результатом высокого уровня инжекции, а также результатом неоднородности слоя. Последний случай имеет особенно большое значение, так как электрическое поле неоднородного полупроводника обуславливает дрейфовый механизм движения носителей независимо от уровня инжекции. Транзисторы без собственного поля базы называются бездрейфовыми, а с собственным полем – дрейфовыми. Оба названия отражают главный механизм перемещения носителей, хотя, как правило, диффузия и дрейф сочетаются.

При изготовлении эмиттерного и коллекторного  $p-n$  переходов бездрейфовых транзисторов трудно получить ровный фронт сплавления, поэтому базу приходится делать сравнительно толстой (несколько десятков микрон). При увеличении площади переходов (для мощных транзисторов) неравномерность сплавления возрастает. Для уменьшения вероятности "прокола" базы её ширину увеличивают ещё больше. Увеличение ширины базы ухудшает частотные свойства транзистора. Методом сплавления изготавливают транзисторы с допустимой мощностью рассеивания от 0,01 до 30 Вт и граничной частотой до 30 МГц.

Основные свойства транзистора определяются процессами в базе, её шириной. Целью настоящей работы является определение ширины базы биполярного транзистора.

### 1 ИЗМЕРЕНИЕ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ДВУМЯ ПЛОСКОСТНЫМИ P-N ПЕРЕХОДАМИ — ШИРИНЫ БАЗЫ

Для определения ширины базы ( $W$ ) можно использовать вольтамперную характеристику транзистора.

Ток через базу из эмиттера в коллектор переносится неосновными носителями, т.е. дырками в базе  $n$ -типа ( $p-n-p$  транзистор) и электронами в базе  $p$ -типа ( $n-p-n$  транзистор). Рассмотрим  $p-n-p$  транзистор. При достаточно малых токах ток  $I_p$  в базе бездрейфового транзистора чисто диффузионный и связан с концентрацией дырок в базе ( $p$ ) соотношением [1].

$$I_p = -e \cdot D_p \cdot S \cdot \frac{dp}{dx}, \quad (1.1)$$

где  $e$  – заряд электрона;

$D_p$  – коэффициент диффузии дырок;

$S$  – площадь поперечного сечения базы.

В случае сплавного бездрейфового транзистора величина  $I_p$  вдоль базы почти не меняется, поэтому интегрировать выражение (1.1) следует при  $I_p = const$

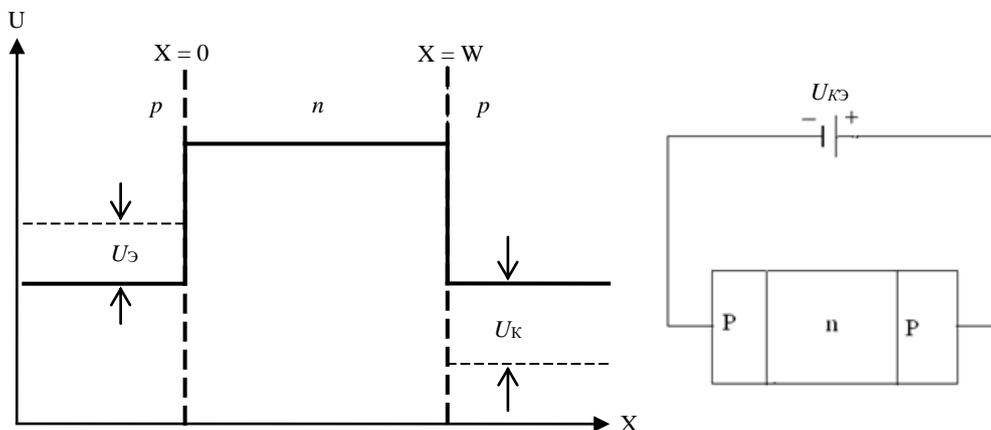
$$I_p \cdot x = -e \cdot D_p \cdot S \cdot P(x) + C1, \quad (1.2)$$

где  $C1$  – постоянная интегрирования. При отсутствии внешнего смещения потенциал в базе постоянен и  $P = P_n = const$  (рис. 1.1).

Для создания инжекции дырок из эмиттера потенциальный барьер эмиттерного  $p-n$  перехода ( $X=0$ ) понижается на величину  $U_{\text{Э}}$ , а потенциальный барьер коллекторного  $p-n$  перехода ( $X = W$ ) повышается на величину  $U_{\text{К}}$ . Концентрация частиц в любой точке экспоненциально убывает или возрастает в зависимости от потенциальной энергии частиц в этой точке. Поэтому при наличии  $U_{\text{Э}}$  и  $U_{\text{К}}$  имеем

$$P(0) = P_n \cdot \exp\left(\frac{eU_{\text{Э}}}{kT}\right), \quad (1.3)$$

$$P(W) = P_n \cdot \exp\left(-\frac{eU_{\text{К}}}{kT}\right). \quad (1.4)$$



Сплошная кривая – в равновесном состоянии; пунктирная – при наличии смещения

Рисунок 1.1 – Распределение потенциала в  $p-n-p$  структуре

С помощью этих условий находим  $C1 uI_p$  согласно (1.2)

$$I_p = -e \cdot D_p \cdot S \cdot \frac{P_n}{W} \cdot \left[ \exp\left(\frac{eU_{\text{Э}}}{kT}\right) - \exp\left(-\frac{eU_{\text{К}}}{kT}\right) \right] \quad (1.5)$$

Если к  $p-n-p$  структуре приложить разность потенциалов (рисунок 1.1), то она распределится между истощенными слоями  $p-n$  переходов эмиттера и коллектора ( $U_{\text{КЭ}} = U_{\text{Э}} + U_{\text{К}}$ ). Падением напряжения вне  $p-n$  переходов (в нейтральной области эмиттера, базы и коллектора) можно пренебречь в виду их большой проводимости.

При температуре  $T = 300 \text{ K}$   $kT/e = 0,026 \text{ В}$ . Поэтому при  $U \ll 0,026 \text{ В}$  (например, при  $U < 5 \text{ мВ}$ ), а значит, при  $U_{\text{К}} < 0,026 \text{ В}$  и  $U_{\text{Э}} < 0,026 \text{ В}$  экспоненты в выражении (1.5) можно разложить в ряд, ограничиваясь двумя первыми членами:

$$I_p = -e \cdot D_p \cdot S \cdot P_n / W \cdot (1 + (e \cdot U_{\text{Э}} / kT) \dots - 1 + (e \cdot U_{\text{К}} / kT) + \dots = e^2 / (kT) \cdot D_p \cdot S \cdot P_n / W \cdot U. \quad (1.6)$$

Измеряя зависимость  $I_p(U)$ , которая при  $U < 5 \text{ мВ}$  линейна, мы можем найти одну из двух основных характеристик полупроводника, расположенного между двумя  $p-n$  переходами (например, базы транзистора) - её ширину  $W$  или её проводимость  $\sigma = e \cdot \mu \cdot n$ .

Так как эмиттер и коллектор могут отличаться по своим сечениям и по проводимости, то измерение  $I_p(U)$  при каждом значении  $U$  нужно провести дважды, меняя полярность напряжения относительно выводов эмиттера и коллектора.

## 2 ЗАДАНИЕ

1 Снять зависимость  $I_p(U)$ , меняя напряжение через интервалы в  $0,5 \text{ мВ}$  для транзисторов, предложенных преподавателем.

2 Используя полученную зависимость  $I_p(U)$ , по формуле (1.6) найти ширину базы  $W$  транзисторов П13, П14, П16, МП41, П201.

### 3 СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ШИРИНЫ БАЗЫ ТРАНЗИСТОРА

Коэффициент диффузии дырок в германии  $Dp = 44 \text{ см}^2/\text{с}$ .

Подвижность электронов в германии  $\mu_n = 3800 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ .

Постоянная Больцмана  $K = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/град}$ .

Заряд электрона  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  ( $1\text{эв} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ ).

$$P_n \cdot n_n = p_n \cdot N_d = n_i^2 = 5 \cdot 10^{26} \text{ см}^{-6}.$$

Для транзисторов П13, П14, П16 считать ширину базы, полагая:

$$\rho_n = 1-2 \text{ Ом} \cdot \text{см}; S = 3 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2.$$

Для транзистора П201:

$$\rho_n = 1.5-2 \text{ Ом} \cdot \text{см}; S = 0,3 \text{ см}^2.$$

### 4 ПОРЯДОК РАБОТЫ

4.1. Собрать схему (рис. 4.1). Обратить особое внимание на полярность при подключении измерительных приборов. Приборы должны быть заарретированы. Сопротивление регулировки напряжения на макете вывести в положение минимума (выводить до упора против часовой стрелки).

4.2. С разрешения преподавателя разарретировать милливольтметр и микроамперметр (после этого перемещать приборы воспрещается).

4.3. Включить макет и, повышая плавно напряжение с помощью сопротивления регулировки напряжения  $R2$  и  $R3$ , произвести необходимые измерения.

4.4. После окончания работы приборы обязательно вновь заарретировать, поставить пределы наименьшей чувствительности.

4.5. В данной работе транзистор испытывается при напряжении не более 5 мВ между эмиттером и коллектором при отключенной базе.

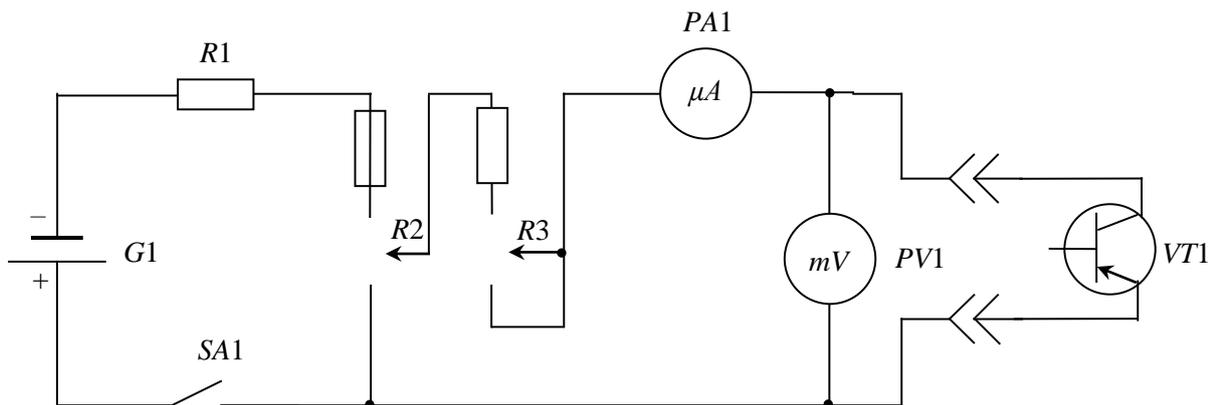


Рисунок 4.1 – Электрическая схема макета

4.6. Измерения проводятся через 0,5 мВ. Далее полярность включения эмиттер-коллектора изменяется и измерения повторяются.

4.7 По средним значениям строится график зависимости тока от напряжения и производится требуемый расчет. При расчете значения тока и напряжения брать на линейном участке зависимости  $I = f(U)$ .

4.8 Все переключения в схеме следует производить при полностью выведенных сопротивлениях регулировки напряжения. В противном случае возможна порча прибора. Исследования проводятся на следующих транзисторах:

- 1) МП13, МП14, МП16 – маломощные сплавные германиевые транзисторы типа  $p-n-p$ ;
- 2) П201 мощный сплавной германиевый транзистор ( $p-n-p$ ).

## 5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 5.1. Как влияет ширина базы  $W$  на ток коллекторного перехода?
- 5.2. В каких случаях и почему ток коллектора будет практически равен току эмиттера?
- 5.3. В чем заключаются отличия мощного транзистора от маломощного?
- 5.4. В чем разница между структурами  $p-n-p$  и  $n-p-n$ ?
- 5.5. Как коэффициент усиления транзистора по току зависит от ширины базы?
- 5.6. Как предельная частота усиления зависит от ширины базы транзистора?
- 5.7. Почему область эмиттера легируют сильнее, чем область базы?

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федотов Я.А. Основы физики полупроводниковых приборов. М.: Сов. радио, 1963. – с.208-242.
2. Гаман В.И. Физика полупроводниковых приборов: Учебное пособие. Томск: Изд-во НТЛ, 2000. – 426 с.
3. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы: Учебник для вузов. 5-е изд., исправленное. СПб.: Издательство «Лань», 2001. – 489 с.
4. Степаненко И. П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. М.: Энергия, 1973. – с.164-170.