

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ БОЛЬЦМАНА

Цель работы:

Исследовать распределение электронов в эмиттере биполярного транзистора и найти постоянную Больцмана.

Задачи:

1. Провести измерения зависимости коллекторного тока транзистора от напряжения между базой и эмиттером.
2. Построить полученную зависимость в полулогарифмическом масштабе и определить угловой коэффициент графика.
3. По результатам измерений вычислить постоянную Больцмана.

**ВВЕДЕНИЕ**

Постоянная Больцмана  $k$  относится к числу так называемых фундаментальных физических констант. В молекулярно-кинетической теории газов ее вводят как отношение молярной, или универсальной, газовой постоянной к числу Авогадро:  $k=R/N_o$ . Однако постоянная Больцмана играет в физике значительно более важную роль. Произведение  $kT$  (здесь  $T$  – абсолютная температура) служит мерой энергии теплового движения частиц и в этом качестве входит в распределение молекул равновесного газа по скоростям или по их кинетическим энергиям (распределение Максвелла), а также в распределение молекул или любых частиц по координатам во внешнем потенциальном поле (распределение Больцмана):

$$n(x, y, z) = n_o \cdot \exp\left(-\frac{E_p(x, y, z)}{kT}\right) \quad (1)$$

Здесь  $n(x, y, z)$  – концентрация молекул в точках поля с потенциальной энергией  $E_p(x, y, z)$ ,  $n_o$  – концентрация в точках, потенциальная энергия в которых равна нулю. Это соотношение означает, что чем выше потенциальная энергия, тем меньше частиц может ее иметь в состоянии термодинамического равновесия. В частном случае для идеального газа, находящегося в однородном поле силы тяжести при постоянной температуре, из этого распределения получается барометрическая формула, которая описывает зависимость давления газа  $p$  от высоты  $z$ :

$$p(z) = p_o \exp\left(-\frac{mgz}{kT}\right) = p_o \exp\left(-\frac{z}{L}\right) \quad (2)$$

Здесь  $m$  – масса молекулы газа. Из барометрической формулы и измеренной зависимости давления воздуха от высоты в принципе можно было бы найти постоянную Больцмана, но значение параметра  $L$  составляет несколько километров и в таких масштабах невозможно поддерживать равновесное состояние газа.

В этой работе аналогом молекул газа служат электроны в области эмиттерного перехода  $n$ - $p$ - $n$  транзистора. В области эмиттера благодаря донорной примеси создается высокая концентрация электронов. В область базы в равновесии может попасть только малая их часть, т.к. из-за электрического поля  $p$ - $n$  перехода потенциальная энергия электронов в ней выше. Разность потенциальных энергий электронов в базе и эмиттере можно уменьшить, если приложить внешнее электрическое поле, направленное против поля  $p$ - $n$  перехода. Для этого между базой и эмиттером следует приложить напряжение  $U_{ЭБ}$  («+» на базе, «-» на эмиттере), так называемое прямое смещение.

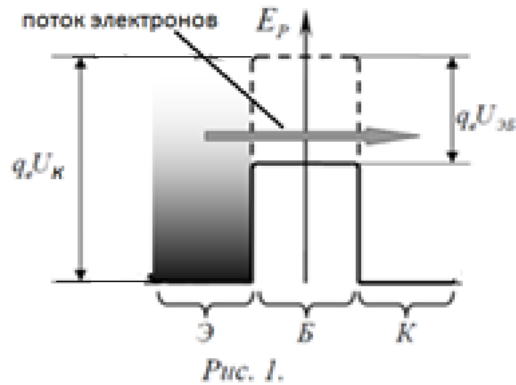


Рис. 1.

Штриховой линией на рис. 1 показана потенциальная энергия электронов на дне зоны проводимости в разных областях транзистора при  $U_{ЭБ} = 0$ . Там же сплошной линией показан ход потенциальной энергии при прямом смещении.

Разность потенциальных энергий уменьшается на величину  $q_e U_{ЭБ}$ , где  $q_e = 1.60 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд электрона по абсолютной величине. Концентрация электронов в базе согласно формуле (1) увеличивается и создается поток электронов из эмиттера, возникает ток эмиттера. Большая часть этого потока захватывается электрическим полем коллекторного р-п перехода. Поэтому ток коллектора примерно равен току эмиттера:  $I_K \approx I_Э$ . Эти токи пропорциональны доле электронов в зоне проводимости эмиттера, энергия которых больше высоты потенциального барьера эмиттер-база. Известно, что, если энергии электронов на несколько  $kT$  превышает энергию дна зоны проводимости, они подчиняются распределению Больцмана. В этом случае для тока коллектора справедливо соотношение (обозначения см. на рис.1):

$$I_K \sim \int_{q_e(U_K - U_{ЭБ})}^{\infty} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dE \sim \exp\left(\frac{q_e U_{ЭБ}}{kT}\right) \quad (3)$$

В данной работе измеряется не сам ток коллектора, а пропорциональное ему падение напряжения на измерительном резисторе  $R_3$ , через который протекает ток коллектора. Падение напряжения на этом резисторе:

$$U_R = I_K R_3 = \text{const} \cdot \exp\left(\frac{q_e U_{ЭБ}}{kT}\right) \quad (4)$$

Прологарифмировав это выражение, получим зависимость:

$$\ln U_R = \text{const}' + \frac{q_e U_{ЭБ}}{kT} \quad (5)$$

Из (5) видно, что при постоянной температуре зависимость  $\ln U_R$  от  $U_{ЭБ}$  линейна и ее угловой коэффициент  $\alpha = q_e/kT$ .

Таким образом, построив зависимость  $\ln U_R$  от  $U_{ЭБ}$  и определив угловой коэффициент  $\alpha$ , а также измерив температуру, можно найти постоянную Больцмана.

$$k = \frac{q_e}{\alpha \cdot T} \quad (6)$$

## УСТАНОВКА

Принципиальная схема установки для изучения зависимости  $U_R = f(U_{ЭБ})$  приведена на рис. 2. Используется транзистор  $n$ - $p$ - $n$  типа, включенный по схеме с общей базой. Здесь БП - блок электропитания.

$R_1$  - ограничительный резистор,  $R_2$  - потенциометр, с помощью которого регулируется напряжение эмиттер-база  $U_{ЭБ}$ ,  $V_1$  - вольтметр для измерения напряжения  $U_{ЭБ}$ ,  $R_3$  - измерительный резистор с малым сопротивлением,  $V_2$  - вольтметр для измерения падения напряжения  $U_R$ .

На рис. 3 показана фотография установки.

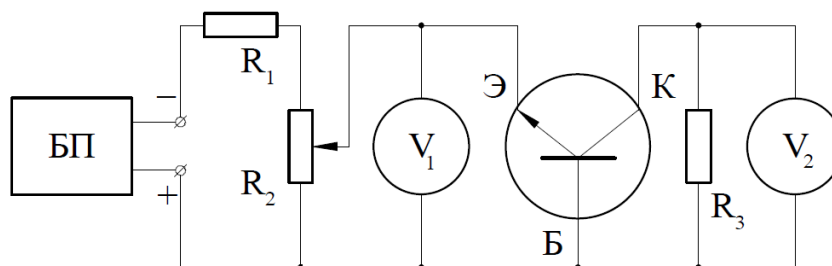


Рис. 2.

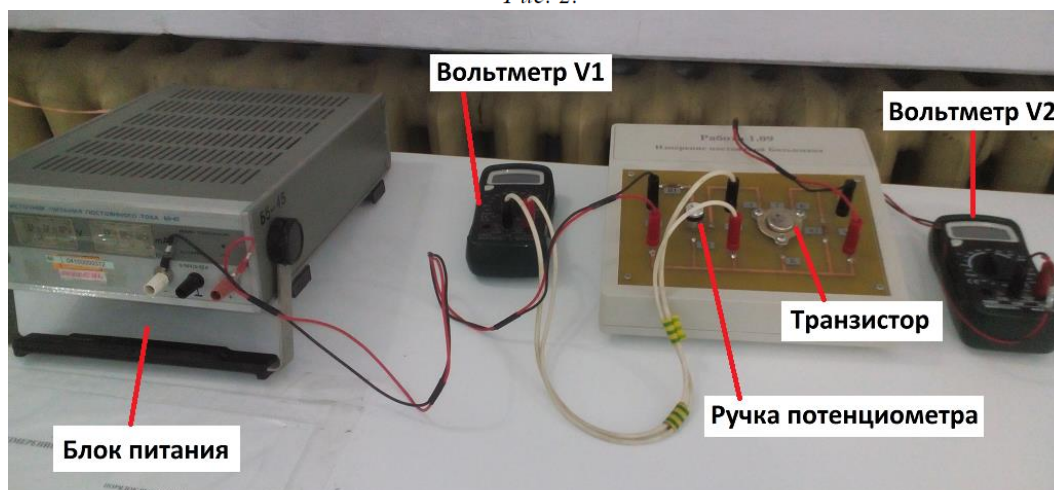


Рис. 3

### ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Соберите электрическую цепь согласно рис. 2.
2. Включите тумблер подачи напряжения на схему и убедитесь в том, что потенциометр  $R_2$  меняет показания обоих вольтметров.
3. Выберите диапазон изменения напряжения эмиттер-база  $U_{ЭБ}$  (ориентировочно в пределах 0,48–0,60 В). В качестве верхней границы диапазона примите максимальное значение  $U_{ЭБ}$ , которое можно установить с помощью потенциометра  $R_2$ . В качестве нижней границы примите то значение  $U_{ЭБ}$ , при котором напряжение на измерительном резисторе  $U_R$  уменьшится примерно в 100 раз по сравнению с максимальным.
4. Измерьте зависимость  $U_R$  от  $U_{ЭБ}$  (12 – 15 экспериментальных точек), меняя при этом напряжение эмиттер-база с шагом не более 1/10 от ширины выбранного диапазона. Результаты (в милливольтках) занесите в таблицу.

Табл.1. Зависимость напряжения на измерительном резисторе  $U_R$  от напряжения эмиттер-база  $U_{ЭБ}$

Номер опыта	$U_{ЭБ}$ , мВ	$U_R$ , мВ	$\ln U_R$
1			
2			
.....			

5. Измерьте комнатную температуру настенным термометром, находящимся в учебной лаборатории, и занесите ее значение в п.5 отчета.
6. Вычислите и занесите в таблицу значения  $\ln U_R$ .
7. Постройте на миллиметровой бумаге график зависимости  $\ln U_R$  от напряжения  $U_{ЭБ}$  (график зависимости  $U_R$  от  $U_{ЭБ}$  в полулогарифмических координатах).
8. Выделите на графике линейный участок. Точки, сильно отклоняющиеся от прямой, исключите из дальнейших расчетов.
9. Вычислите угловой коэффициент полученной прямой  $\alpha$  методом парных точек. Для вычислений используйте таблицу 2, которую поместите в п.9 отчета.

Табл.2. Вычисление углового коэффициента зависимости  $\ln U_R = f(U_{ЭБ})$  методом парных точек.

Пары точек	$\Delta \ln U_R$	$\Delta U_{ЭБ}$ , мВ	$\alpha$ , В <sup>-1</sup>	$\alpha - \langle \alpha \rangle$ , В <sup>-1</sup>	$(\alpha - \langle \alpha \rangle)^2$ , В <sup>-2</sup>
1-6					
2-7					
.....					
5-10					
			$\langle \alpha \rangle =$		$\Sigma(\alpha - \langle \alpha \rangle)^2 =$

Примеры расчета  $\Delta \ln U_R$ ,  $\Delta U_{ЭБ}$  и  $\alpha$  по формуле  $\alpha = \frac{\Delta \ln U_R}{\Delta U_{ЭБ}}$  поместите в п.9 отчета.

10. Вычислите среднее значение углового коэффициента зависимости  $\ln U_R = f(U_{ЭБ})$  и его случайную погрешность методом парных точек, описанным в учебном пособии [«Практическая обработка экспериментальных данных»](#). Соответствующие расчеты поместите в п.10 отчета.

11. По формуле (6) вычислите постоянную Больцмана, используя измеренное значение комнатной температуры и табличное значение элементарного заряда  $q_e = 1,60 \cdot 10^{-19}$  Кл.

12. Вычислите и поместите в п.10 отчета относительные погрешности измерения температуры и углового коэффициента зависимости  $\ln U_R = f(U_{ЭБ})$ , относительную и абсолютную погрешности определения постоянной Больцмана.

11. Запишите в п.12 отчета окончательный результат измерений.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите содержащие постоянную Больцмана физические соотношения.
2. Из каких соображений график в этой работе следует строить в полулогарифмических координатах?
3. Как можно обработать данные, представленные на графике, если сделать целью грубую оценку углового коэффициента?
4. Почему в качестве модельного объекта выбран транзистор, а не полупроводниковый диод?