

Работа 1.09

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_{EB} («+» на базе, «-» на эмиттере), так называемое прямое смещение.

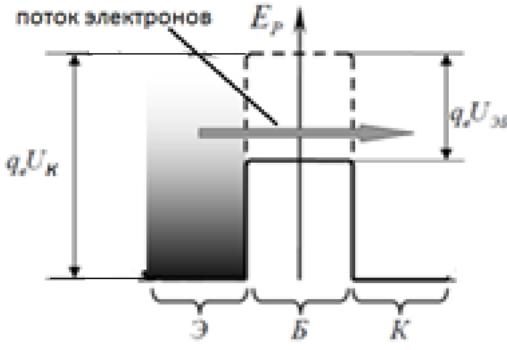


Рис. 1.

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 превышают 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 α , 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.

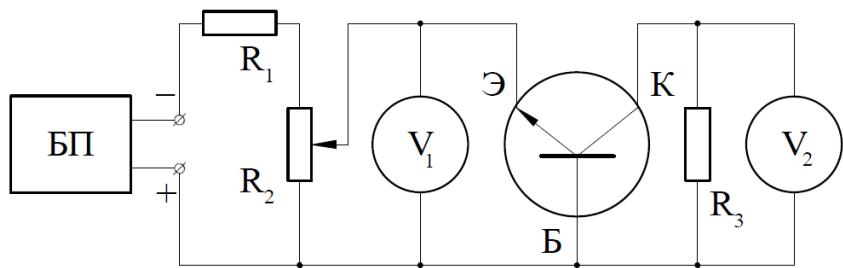


Рис. 2.

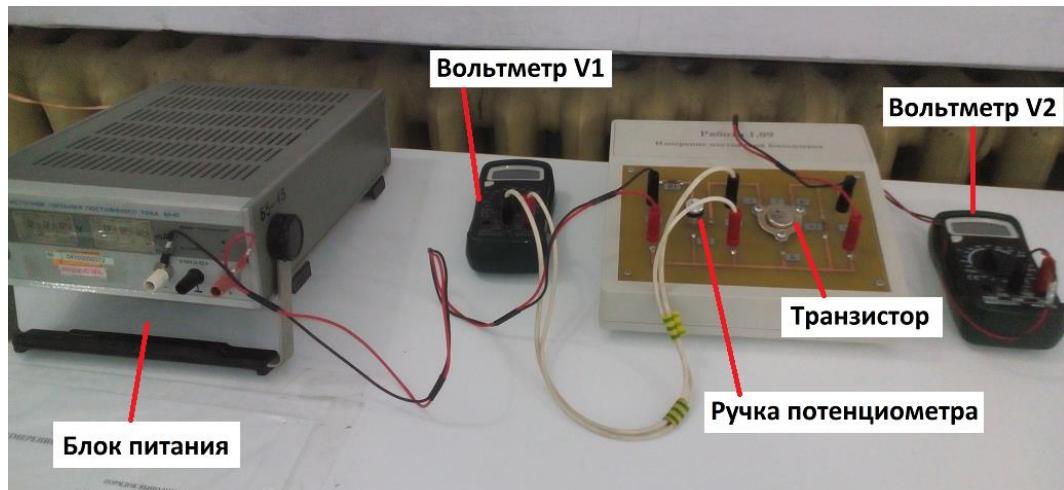


Рис. 3

ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

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

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

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

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

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

Пары точек	$\Delta \ln U_R$	$\Delta U_{\text{ЭБ}}$, мВ	α, B^{-1}	$\alpha - \langle \alpha \rangle, \text{B}^{-1}$	$(\alpha - \langle \alpha \rangle)^2, \text{B}^{-2}$
1-6					
2-7					
.....					
5-10			$\langle \alpha \rangle =$		$\Sigma (\alpha - \langle \alpha \rangle)^2 =$

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

10. Вычислите среднее значение углового коэффициента зависимости $\ln U_R = f(U_{\text{ЭБ}})$ 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 $\ln U_R = f(U_{\text{ЭБ}})$, 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?