

РАБОТА 1.04

ИЗМЕРЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ БОЛЬЦМАНА.

Задача

1. Провести измерения зависимости коллекторного тока транзистора от напряжения между базой и эмиттером.
2. По результатам измерений вычислить постоянную Больцмана.

Введение

В молекулярно-кинетической теории газов постоянную Больцмана часто вводят как отношение универсальной газовой постоянной к числу Авогадро: $k=R/N_0$. Однако, постоянная Больцмана играет в физике значительно большую роль, чем универсальная газовая постоянная. Она является одной из фундаментальных физических констант и содержится в выражениях физических законов из различных областей физики: статистической физики, теории электричества, магнетизма, оптики, атомной физики и квантовой механики.

Так, например, закон равнораспределения энергии по степеням свободы молекул утверждает, что средняя кинетическая энергия, приходящаяся на одну степень свободы молекулы, равна $\frac{1}{2}kT$ (здесь T - абсолютная температура). Эта же энергия входит в формулу, выражающую закон распределения молекул по скоростям или по их кинетическим энергиям (распределение Максвелла), а также в распределение молекул идеального газа по координатам во внешнем потенциальном поле (распределение Больцмана):

$$n(x, y, z) = n_0 \exp\left(-\frac{E_p(x, y, z)}{kT}\right) \quad (1)$$

Здесь $n(x, y, z)$ - концентрация молекул в точках поля с потенциальной энергией $E_p(x, y, z)$, n_0 - концентрация в точках, потенциальная энергия в которых равна нулю. Для газа, находящегося в однородном поле силы тяжести при постоянной температуре, из этого распределения получим известную барометрическую формулу:

$$p(z) = p_0 \exp\left(-\frac{mgz}{kT}\right) \quad (2)$$

Если бы нам удалось измерить давление газа на разных высотах, находящегося в изотермических условиях в однородном поле в стакане с бесконечно высокими стенками, то по этой формуле мы легко бы рассчитали постоянную Больцмана. Однако, в лабораторных условиях подобный эксперимент невозможен. В данной работе аналогом газа в сосуде с высокими стенками будут электроны в области эмиттера n-p-n транзистора (или дырки в p-n-p транзисторе). Один из потенциальных барьеров для электронов в эмиттере (рис. 1) создается полем перехода эмиттер-база, а второй барьер создается внешним источником питания в цепи эмиттера. Штриховой линией на рис. 1 показана потенциальная энергия электронов в разных областях транзистора, когда отсутствует внешнее смещение ($U_{эб}$ равно нулю).

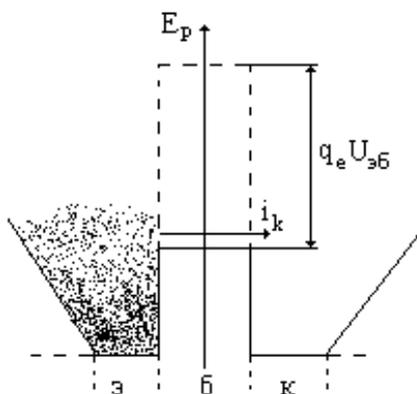


Рис. 1

энергия электронов в разных областях транзистора, когда отсутствует внешнее смещение ($U_{эб}$ равно нулю). При включении внешнего источника в цепь эмиттер-база, высота потенциального барьера для электронов уменьшается на величину $q_e U_{эб}$, электроны с энергиями большими энергии барьера уже могут попасть в область базы. Большинство электронов, попавших в эту область, не попадают на базовый электрод и затем на плюс источника питания (рис. 2) из-за особенностей геометрии транзисторной структуры: область базы очень тонкая, плоская, и электроны проскакивают ее по инерции, оказываясь в поле коллекторного перехода, а затем и в коллекторе. Поэтому ток коллектора примерно равен току эмиттера: $i_k \approx i_э$.

В упомянутых распределениях, а также других физических выражениях kT можно рассматривать как естественный масштаб энергии, удобный для сравнения различных видов энергии со средней энергией теплового движения молекул (в нашем эксперименте - электронов). При комнатной температуре kT по порядку величины составляет 10^{-21} Дж (или примерно 0.01 эВ), поэтому высоту барьеров для электронов можно считать достаточно большой (справа порядка $E_g \approx 1$ эВ, слева порядка десятых долей эВ).

Ток коллектора, протекающий через транзистор, будет пропорционален относительной доле электронов, энергия которых в потенциальной яме больше энергии потенциального барьера эмиттер-база:

$$i_k = \frac{dq}{dt} = q_e \frac{dN}{dt} \approx \int_{E_g - q_e U_{эб}}^{\infty} n(E) dE \approx \int_{E_g - q_e U_{эб}}^{\infty} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dE \approx \exp\left(\frac{q_e U_{эб}}{kT}\right) \quad (3)$$

Нижний предел интегрирования $E_1 = E_g - q_e U_{эб}$ (q_e - заряд электрона). Высота барьера эмиттер-база меняется за счет включения в цепь базы внешнего регулируемого источника напряжения. Следует отметить, что практически все напряжение источника приложено к переходу эмиттер-база, так как падения напряжения на других участках цепи базы нет из-за того, что базовый ток пренебрежимо мал.

Измерять ток коллектора в данной работе будем косвенным образом, измеряя падение напряжения на резисторе R_3 , через которое протекает ток коллектора. Падение напряжения на этом резисторе $U_R = I_k R_3$.

Используя выражение для коллекторного тока (3) для U_R получим:

$$U_R = \text{const} \exp\left(\frac{q_e U_{эб}}{kT}\right) \quad (4)$$

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:

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

Установка

Схема для изучения зависимости $U_{бк} = f(U_{эб})$ приведена на рис.2.

СПбГПУ кафедра "экспериментальная физика" В.П. Маслов, Т.М. Маслова

Измерение постоянной Больцмана

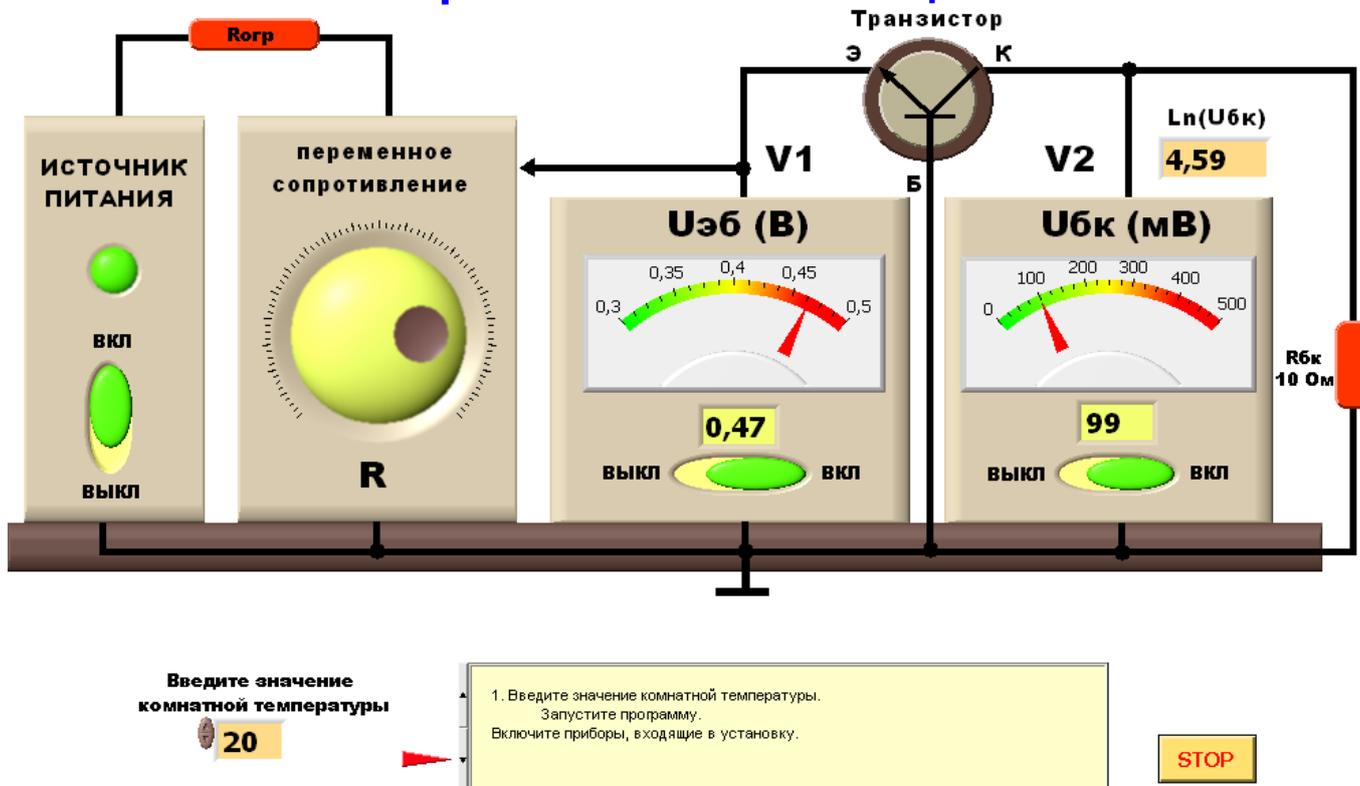


Рис. 2

Используется транзистор n-p-n типа, включенный по схеме с общей базой. Напряжение с блока питания подается на схему через ограничительный резистор $R_{огр}$. Потенциометром R можно изменять напряжение $U_{эб}$, V_1 - вольтметр для измерения $U_{эб}$, $R_{бк}$ - резистор с малым сопротивлением, V_2 - вольтметр для измерения падения напряжения $U_{бк}$.

Измерения и обработка результатов

1. Запустите программу. Включите приборы, входящие в установку.
2. Изменяя напряжение $U_{эб}$ с помощью инструмента «УПРАВЛЕНИЕ», снимите показания вольтметра V_1 и V_2 . Результаты занесите в таблицу 1. (Для удобства на передней панели приведен индикатор, показывающий значения $\ln(U_{бк})$).

Таблица 1

Номер опыта	$U_{эб}$, В	$U_{бк}$, В	$\ln U_{бк}$
1			
2			
...			
10			

3. Постройте график зависимости $\ln(U_{бк}) = f(U_{эб})$.
4. Для нахождения углового коэффициента (методом парных точек) занесите исходные и расчетные данные в таблицу 2

Таблица 2

№ точки	$x_i = U_{эб}$ В	$y_i = \ln U_{бк}$	№ точки	$x_i' = U_{эб}$ В	$y_i' = \ln U_{бк}$	$y_i' - y_i$	$x_i' - x_i$	$\alpha = \frac{y_i' - y_i}{x_i' - x_i}$
1			6					
2			7					
3			8					
4			9					
5			10					
								$\langle \alpha \rangle =$

5. Вычислите постоянную Больцмана по формуле.

$$k = \frac{q_e}{\alpha T}$$

6. Среднеквадратичное отклонение от среднего определите по формуле:

$$\sigma_{\bar{\alpha}} = \sqrt{\frac{\sum (\alpha_i - \bar{\alpha})^2}{N(N-1)}}$$

7. Запишите окончательный результат в стандартной форме

$$k = \bar{k} \pm \sigma_{\bar{\alpha}}$$

8. Сделайте выводы по работе.

Литература

1. Механика и молекулярная физика (учебно-методическое пособие). СПбГТУ, 1998
2. Обработка экспериментальных результатов (методические указания к лабораторным работам). СПбГТУ, 1998.