РАБОТА 2.03
КОНЦЕНТРАЦИЯ И ПОДВИЖНОСТЬ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПРИМЕСНОМ ПОЛУПРОВОДНИКЕ

Задача

1. Снять вольтамперную характеристику (ВАХ) полупроводникового образца.
2. Вычислить удельную проводимость материала образца.
3. Измерить зависимость холловской электродвижущей силы (ХЭДС) от индукции магнитного поля.
4. Вычислить подвижность основных носителей заряда.

Введение

Начиная подготовку к этой работе, предварительно ознакомьтесь с введением к работе 2.02. Ниже используется ряд полученных там соотношений.

В отличие от работы 2.02 сопротивление испытуемого образца получается не прямым измерением, а методом амперметра и вольтметра. Испытуемым образцом служит пластина (рис. 1) из полупроводникового материала.

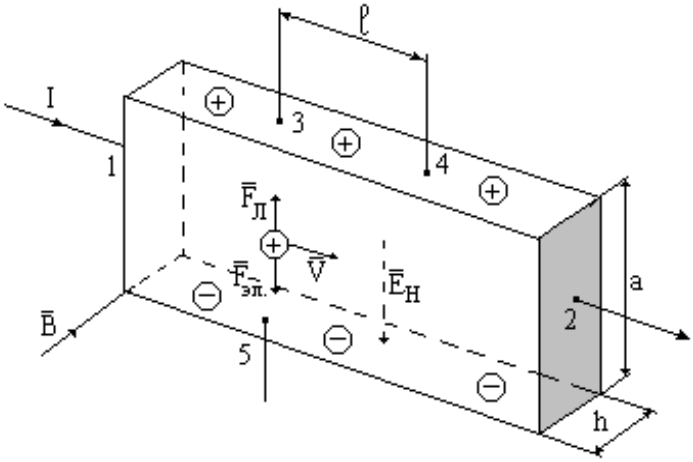

Рис.1

По показаниям амперметра I (силе тока через образец) и показаниям вольтметра U_ℓ (напряжению между электродами 3-4) удельную проводимость вычисляют по формуле

$$\sigma = \frac{I}{U} \cdot \frac{\ell}{a \cdot h}, \qquad (1)$$

где ℓ - расстояние между электродами, a - ширина образца, h - его толщина (a·h - площадь поперечного сечения).

Материалом образца служит резко выраженный примесный полупроводник. Концентрация носителей заряда одного типа много больше, чем другого; носители первого типа называют **основными**. Например, на рис.1 изображен полупроводник с дырочной проводимостью, основными носителями в нем служат «дырки», концентрация их много больше концентрации свободных электронов. Удельная проводимость такого полупроводника описывается формулой

$$\sigma = q \cdot n \cdot \mu . \qquad (2)$$

Здесь q - заряд, n - концентрация, μ - подвижность носителей.

Подвижность определяется соотношением

$$\vec{u} = \mu \cdot \vec{E}, \qquad (3)$$

где $\vec{u}$ - скорость дрейфа носителей под действием электрического поля напряженностью $\vec{E}$. Если известен заряд каждого носителя и удается измерить их концентрацию, можно вычислить подвижность носителей заряда

$$\mu = \frac{\sigma}{q \cdot n}. \qquad (4)$$

Способ измерения удельной проводимости σ указан выше.

Для нашего случая (один тип носителей заряда) плотность тока

$$\vec{j} = q \cdot n \cdot \vec{u}, \qquad (5)$$

направлением вектора $\vec{j}$ (направлением тока) условно считают направление движения положительных носителей заряда, совпадающее с направлением напряженности поля $\vec{E}$. В случае отрицательных носителей ток того направления создается их движением «против поля». Действительно, вектор плотности тока в формуле (5) остается прежним (включая знак!), если совместно изменить знаки заряда q и скорости $\vec{u}$.

Сравнительно простым способом можно установить знак основных носителей и измерить их концентрацию [3, с.320-327]. Поместим образец в поперечное однородное магнитное поле с индукцией $\vec{B}$ (см. рис.1, $\vec{B}$ перпендикулярно грани (a, ℓ)). На носитель заряда теперь действует магнитная сила, перпендикулярная векторам $\vec{u}$ и $\vec{B}$, то есть параллельная ребру «а» образца:

$$\vec{F}_Л = q \cdot \left[\vec{u}, \vec{B}\right]. \qquad (6)$$

Она вызовет поперечное смещение положительных носителей к «верхней» (на рис.1) грани. Но перенос носителей через «верхнюю» и «нижнюю» грани невозможен. Поэтому на одной из граней создается избыток основных носителей, а на другой - их недостаток. Поверхностные заряды на рис.1 условно показаны значками «+» и «-» . В образце возникает поперечное (холловское) электрическое поле напряженностью U_H, а между указанными гранями установится разность потенциалов (ХЭДС).

Вычислить ХЭДС легко из условия, что в установившемся режиме носители заряда не могут двигаться в направлении ребра а, то есть электрическая сила $F_{кл.}=q \cdot E_H$ должна уравновесить магнитную

$$q \cdot E_H = q \cdot u \cdot B, \qquad (7)$$

и, следовательно, ХЭДС

$$U_H = E_H \cdot a = u \cdot a \cdot B\,. \qquad (8)$$

Если, используя формулу (5), исключить отсюда скорость дрейфа и учесть, что плотность тока $j = I / (a \cdot h)$ (I - сила тока), получим

$$U_H = \frac{I}{h} \cdot \frac{B}{q \cdot n}\,. \qquad (9)$$

Полагая, что заряд носителя q совпадает по модулю с элементарным зарядом e, получает для концентрации носителей

$$n = \frac{I}{h} \cdot \frac{B}{e \cdot U_H}\,. \qquad (10)$$

Теперь по формуле (4) можно вычислить подвижность носителей μ.

Измерение ХЭДС позволяет также найти знак основных носителей. Рис.1 выполнен для случая «дырочного» полупроводника. Направление магнитной силы будет тем же и для «электронного» полупроводника, если сохранить направления плотности тока и индукции магнитного поля. Но теперь «верхняя» (на рисунке) грань окажется заряженной отрицательно, «нижняя» - положительно. Изменится знак ХЭДС.

Установка

Схема установки приведена на рис.2.

Для питания образца и электромагнита служат «Источник питания образца» и «Источник питания электромагнита». Ток через образец контролируется прибором «$I_{обр.}$, мА», а ток магнита прибором «$I_{магн.}$, мА». При изменении тока через электромагнит индукция магнитного поля контролируется прибором «B, мТл».

Образец имеет пять электродов (рис.1) и подключается к измерительной схеме посредством «платы коммутации». Торцевые электроды 1 и 2 служат для подвода к образцу тока, три «потенциальных» электрода 3,4,5 служат для измерения продольной U_l и поперечной $U_н$ разности потенциалов, регистрируемых соответственно приборами «U_l, мВ» и «$U_н$, мВ». Переключатель «Образец» служит для выбора типа полупроводника «1» или «2».

Концентрация и подвижность носителей заряда в примесном полупроводнике

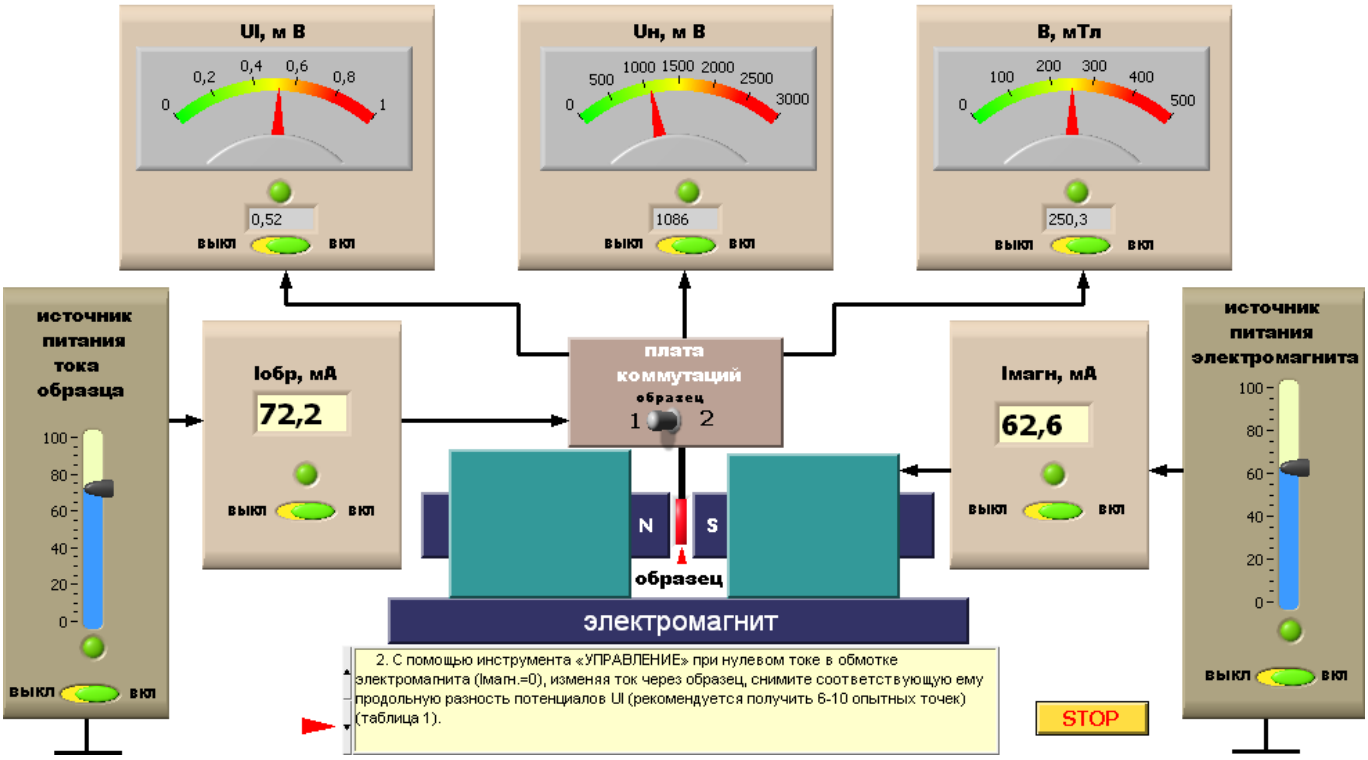

Рис.2

Измерения и обработка результатов

1. С помощью инструмента «УПРАВЛЕНИЕ» при нулевом токе в обмотке электромагнита ($I_{магн.}$=0) изменяя ток через образец, снимите соответствующую ему продольную разность потенциалов U_l (рекомендуется получить 6-10 опытных точек). Результаты занесите в таблицу 1.

Таблица 1

i	I, мА	U_l, мВ	j	I, мА	U_l, мВ	$R_{i\,j}$, Ом	$R_{i\,j}$-<R>, Ом	$(R_{i\,j}-\langle R\rangle)^2$, Ом^2
$\langle R_{i\,j}\rangle$=								

2. Установите ток через образец (50-70 мА), при котором будете измерять ХЭДС, и, изменяя ток через электромагнит, снимите поперечное напряжение $U_н$. Проведите 6-10 измерений при различных токах через электромагнит. Результаты занесите в таблицу 2.

Таблица 2

I	$I_м$, мА	B, Тл	$U_н$, мВ	j	$I_м$, мА	B, Тл	$U_н$, мВ
...							

3. Постройте график зависимости $U_l = U_l(I_{обр.})$.
4. Методом парных точек [2, с.35-36] найдите сопротивление $R = dU_l/dI$ и оцените погрешности его измерения: абсолютную ΔR и относительную $\delta R = \Delta R/R$.
5. В соответствие с формулой вычислите удельную проводимость материала образца

$$\sigma = \frac{1}{R}\cdot\frac{1}{a\cdot h},$$

относительную и абсолютную погрешности ее измерения:

$$\delta\sigma = \sqrt{(\delta R)^2 + (\delta a)^2 + (\delta h)^2 + (\delta l)^2},$$

$$\Delta\sigma = \delta\sigma\cdot\sigma.$$

6. Постройте график зависимости $U_н = U_н(B)$.

7. Методом парных точек вычислите значение величины $Y=dU_н/dB$ и оцените погрешность ее измерения: абсолютную ΔY и относительную $\delta Y=\Delta Y/Y$. Используйте таблицу 3.

Таблица 3

Пары точек i j	$U_{нi}$ -$U_{нj}$, мВ	B_i - B_j, Тл	Y_{ij}, В/Тл	Y_{ij} - <Y>, В/Тл	$(Y_{ij}$ - <Y>$)^2$, $В^2/Тл^2$
$\langle Y_{ij}\rangle$=					

8. В соответствии с формулой ($n = \frac{I}{h} \cdot \frac{B}{e \cdot U_H}$) вычислите концентрацию носителей зарядов

$$n = \frac{I}{h} \cdot \frac{l}{e \cdot Y}.$$

относительную и абсолютную погрешности ее измерения

$$\delta n = \sqrt{(\delta Y)^2 + (\delta h)^2 + (\delta I)^2}$$

$$\Delta n = \delta n \cdot n.$$

9. В формуле ($\mu = \frac{\sigma}{q \cdot n}$) положите q=e и по предыдущим данным вычислите подвижность носителей μ, относительную и абсолютную погрешности ее измерения:

$$\delta\mu = \sqrt{(\delta\sigma)^2 + (\delta n)^2},$$

$$\Delta\mu = \delta\mu \cdot \mu.$$

10. Запишите окончательные результаты Ваших измерений

$$\sigma = (...\pm...)(Ом \cdot м)^{-1} \qquad \text{(см. п.5)}$$

$$n = (...\pm...)м^{-3} \qquad \text{(см. п.8)}$$

$$\mu = (...\pm...)м^2 / (В \cdot с) \qquad \text{(см. п.9)}$$

Литература

1. Электричество и магнетизм (методические указания к лабораторным работам). СПбГТУ, 1997
2. Обработка экспериментальных результатов (методические указания к лабораторным работам). СПбГТУ, 1998.
3. Калашников С.Г. Электричество. М., Наука, 1985, с.576