

## МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ СУЧАСНИХ ПРЕДМЕТНИХ ДИДАКТИК

УДК 537.31:621.315.5 (076.5)

П. С. Атаманчук<sup>1</sup>, А. О. Губанова<sup>1</sup>, В. З. Никорич<sup>2</sup>, О. В. Куликова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Каменець-Подольський національний університет ім. Івана Огієнка

<sup>2</sup>Молдавський державний університет

<sup>3</sup>Інститут прикладної фізики АНМ

### НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ФИЗИКЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

В статье указаны особенности решения задач по физике полупроводников, состоящие в том, что решение каждой задачи требует дополнительного описания условий, в которых находится полупроводник и применения тех теоретических положений, которые учитывают эти условия. Рассматриваются кинетические эффекты в полупроводниках. Описан эффект Холла, приведено решение задачи по определению угла Холла.

**Ключевые слова.** Решение задач Полупроводник. Кинетические эффекты. Эффект Холла.

Изучение современной физики студентами физико-математических факультетов университетов, а также студентами технических вузов, специализирующихся в областях, где используются полупроводниковые материалы, требует навыков решения задач, которые позволяют связать теоретические знания с экспериментальными результатами, полученными в данных условиях.

В педагогических Вузах экспериментальные результаты можно получить при выполнении лабораторного практикума, например, во время изучения курса «Некоторые вопросы физики твердого тела». При выполнении лабораторной работы студент получает экспериментальные данные, объяснение которых необходимо понимание различных физических процессов, происходящих в полупроводниках.

Студент проводит несколько стадий научного исследования: проводит измерения и получает оригинальные экспериментальные результаты; изучает теорию, которая позволит ему объяснить полученный результат; оценивает, может ли данная физическая задача быть решена с применением данной теории. В этом случае студент получает полное представление о работе естествоиспытателя, усовершенствует как навыки практической работы, так и способности сопоставления физических теорий в их логической взаимосвязи. Студент чувствует какой путь нужно пройти, чтобы от наблюдения физического эффекта, перейти к формулировке четкой физической задачи.

В сборнике задач по физике [1, с.7] авторы, описывая уровни понимания учебного материала по физике, используют характеристики: умение, навыки, убеждение. Если качество знаний соответствует уровню «убеждение», то, как правило, в условии задачи есть слова «устранить противоречие» и для решения такой задачи необходимо применение нескольких физических теорий, или учета внешних факторов, позволяющих объяснить возникшее противоречие.

Такой уровень знаний учебного материала дает возможность использовать методику, приведенную ниже.

Методика состоит из следующих шагов:

- описан наблюдаемый эффект;
- приведено его теоретическое объяснение;
- сформулирована конкретная физическая задача по определению отношения длины свободного пробега электрона к радиусу окружности, по которой он движется под действием внешнего магнитного поля;
- указан критерий слабого магнитного поля;

- выбрана теория, которая применима в этих условиях;
- приведено решение задачи.

Рассматривается кинетический эффект – эффект Холла. Кинетические эффекты связаны с ориентированным перемещением электрических зарядов под действием внешнего поля. Количество носителей заряда в полупроводниках и их знак определяется химическим составом, типом кристаллической решетки, температурой, количеством примесей и т.д., поэтому решение любых задач должно учитывать довольно большое количество физических параметров. Проводимость полупроводника определяется концентрацией носителей заряда и их подвижностью. Для примесного полупроводника источниками носителей заряда являются атомы примеси. Но в любом полупроводнике всегда присутствует собственная проводимость, которая связана с переходом электрона из валентной зоны в зону проводимости, при этом «рождается» два носителя заряда. Для возникновения собственных носителей заряда нужна энергия большая, чем при образовании примесных носителей заряда. В полупроводниках энергия, необходимая для образования носителей заряда, черпается из теплового движения и зависит от температуры. Зависимость проводимости от температуры можно разбить на три области:

- область низких температур (носителями заряда являются электроны, отщепленные от атомов примеси –  $n$ -тип, или «дырки» – положительно заряженные области, из которых электроны «ушли» на энергетические уровни основных атомов –  $p$ -тип). В этой области температур есть ещё достаточно атомов примеси, которые ещё не «отдали» свои носители и с увеличением температуры происходит увеличение концентрации примесных носителей электрического заряда;
- область средних температур (в этой области все возможные примесные носители заряда уже перешли в «свободное» состояние). Их концентрация остается постоянной, и изменение проводимости происходит только за счет изменения подвижности примесных носителей заряда с температурой;
- область высоких температур (в этой области присутствует два механизма «рождения» носителей заряда – к примесной проводимости добавляется «собственная» проводимость полупроводника). В этом случае каждый переход электрона в более высокое энергетическое состояние, в котором он приобретает свойства носителя заряда, сопровождается образованием «дырки», которая

также приобретает свойства носителя заряда, но положительного знака.

На рис. 2 приведена зависимость коэффициента Холла ( $\ln R_H$ ) от температуры ( $1/T$ ), на которой указаны две точки, соответствующие температуре истощения примеси  $T_{ист}$  и температуре перехода к собственной проводимости  $T_i$ . (Для наглядности графического изображения зависимости принято использовать  $\ln R_H$  и  $1/T$ ).

Одним из наиболее важных гальваномагнитных эффектов является эффект Холла, который позволяет наиболее простым методом определить концентрацию носителей заряда в полупроводнике. Приведем теоретическое описание эффекта Холла.

Пусть вдоль полупроводника прикладывается внешняя разность потенциалов  $\vec{\varepsilon}_H$  и течет электрический ток с плотностью  $\vec{j}$  (рис. 1). В этом случае носители заряда приобретают дрейфовую скорость  $\vec{v}_d$ , направленную для дырок по полю, а для электронов – в обратном направлении, т.е. против направления внешнего поля.

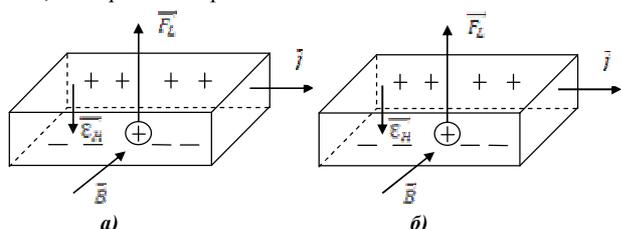


Рис. 1. Возникновение поля Холла в дырочном (а) и электронном (б) полупроводниках

Вектор индукции  $\vec{B}$  магнитного поля, которое предполагается слабым, направлен перпендикулярно направлению тока. Сила Лоренца, действующая на движущийся в магнитном поле заряд, отклоняет его в направлении, перпендикулярном как  $\vec{j}$ , так и  $\vec{B}$ , в результате чего на одной из граней будет накапливаться отрицательный заряд, а на противоположной грани – положительный. Накапливание заряда будет иметь место до тех пор, пока сила возникшего электрического поля Холла не уравновесит силу Лоренца:

$$e[\vec{v}_d \times \vec{B}] = e\vec{\varepsilon}_H, \quad (1)$$

где  $\vec{\varepsilon}_H$  – напряженность электрического поля Холла. Как видно (рис. 1), направление  $\vec{\varepsilon}_H$  зависит от типа проводимости полупроводника.

Поскольку векторы  $\vec{v}_d$ ,  $\vec{B}$  и  $\vec{\varepsilon}_H$ , взаимно перпендикулярны, то их модули связаны скалярным уравнением. Величина скорости движения зарядов вдоль внешнего поля связана с измеряемой экспериментально величиной тока. Величина  $\vec{\varepsilon}_H$ , связана с экспериментально измеряемой разностью потенциалов Холла. Подставив выражения  $\vec{v}_d$  и  $\vec{\varepsilon}_H$  через измеренные величины в (1), получим:

$$U_H = \frac{1}{en} \cdot \frac{IB}{d}, \quad (2)$$

где  $U_H$  – э.д.с. Холла,  $d$  – толщина образца в направлении магнитного поля. Если учесть максвелловское распределение носителей заряда по скоростям в невырожденных полупроводниках, то вместо (2) получим

$$U_H = \frac{A_H}{en} \cdot \frac{IB}{d}, \quad (3)$$

где коэффициент  $A_H$  называют Холл-фактором. Это постоянная, которая зависит от механизма рассеяния носителей заряда, и равная:

- при рассеянии на акустических фононах  $A_H = 3\pi/8 = 1,17$ ;
- при рассеянии на ионах примеси  $A_H = 315\pi/512 = 1,93$ ;
- при рассеянии на оптических фононах ( $T \gg \Theta$ )  $A_H = 1,11$ ;
- в остальных случаях (рассеяние на нейтральных примесях, вырожденный газ, сильное магнитное поле)  $A_H = 1$ .

Коэффициент  $A_H/en$  называют **постоянной Холла** или **коэффициентом Холла**:

$$R_H = \pm \frac{A_H}{en}, \quad (4)$$

где знак «+» относится к р-типу проводимости, а знак «-» относится к n-типу проводимости.

В общем случае, когда имеются два типа носителей заряда, коэффициент Холла равен

$$R_H = \frac{A_H}{e} \cdot \frac{p\mu_p^2 - n\mu_n^2}{(p\mu_p - n\mu_n)}. \quad (5)$$

Не сложно заметить, что (4) представляет собой частный случай (5), когда концентрации одного типа носителей намного меньше концентрации другого.

В области собственной проводимости, согласно (5),

$$R_{Hi} = \frac{A_H}{en_i} \cdot \frac{\mu_p - \mu_n}{\mu_p + \mu_n} \quad (6)$$

и поскольку обычно  $\mu_n > \mu_p$ , то  $R_{Hi}$  является величиной отрицательной.

Таким образом, согласно (4)–(6), температурная зависимость коэффициента Холла, определяемая концентрацией носителей заряда, для электронных полупроводников является монотонной (рис. 2, а), а на зависимости  $R_H(1/T)$  в случае дырочного полупроводника наблюдается разрыв, связанный с инверсией знака коэффициента Холла (рис. 2, б).

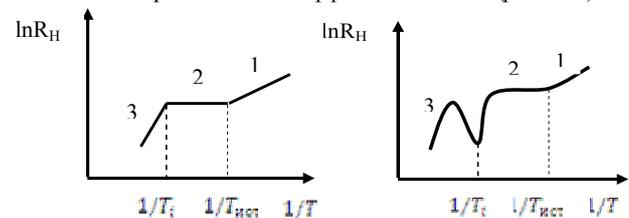


Рис.2. Зависимость коэффициента Холла для электронного (а) и дырочного (б) полупроводника от температуры полупроводников

Отметим, что измерение э.д.с. Холла обычно проводят для двух направлений магнитного поля, что позволяет исключить “паразитные” э.д.с.  $U^*$ , возникающие как из-за несимметричности расположения зондов, так и при неравномерном разогреве образца. В общем случае измеряемая разность потенциалов представляет собой сумму:

$$U = U_H + U^*. \quad (7)$$

Для двух противоположных направлений магнитного поля ( $+\vec{B}$  и  $-\vec{B}$ ) э.д.с. Холла меняет знак, в то время как знак “паразитных” э.д.с.  $U^*$  остается неизменным, при этом различают два случая:

Если  $|U^*| < |U_H|$ , то

$$U_1^{+B} = U_H + U^*, \quad -U_1^{-B} = -U_H + U^*. \quad (8)$$

Исключая  $U^*$ , получаем

$$U_H = \frac{U_1 + U_2}{2}. \quad (9)$$

Если  $|U^*| > |U_H|$ , то

$$U_1^{+B} = U_H + U^*, \quad U_2^{-B} = -U_H + U^*. \quad (10)$$

Исключая  $U^*$ , получаем

$$U_H = \frac{U_1 - U_2}{2}. \quad (11)$$

Таким образом, в зависимости от значений измеряемых э.д.с.  $U_1$  и  $U_2$ , пользуемся формулой (9) или (11).

Сравнивая выражения для электропроводности (10) и коэффициента Холла (4), получаем  $\sigma = \frac{A_H}{R_H} \cdot \mu_n$  или

$$\mu_{nH} = A_H \mu_n = R_H \sigma, \quad (12)$$

$\mu_{nH}$  – холловская подвижность, которая отличается от дрейфовой подвижности только коэффициентами  $A_H$ .

**Задача.** Коэффициент Холла и удельное сопротивление полупроводника равны  $3,66 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{Кл}$  и  $8,93 \cdot 10^{-4} \text{ Ом м}$ , соответственно. Магнитное поле, приложенное к полупроводнику, считается слабым и равно  $0,5T$ . Отношение холловской подвижности к дрейфовой равно  $3\pi/8$ . Найти угол Холла [2, с.50].

**Решение.** В слабких магнитных полях отклонение носителей заряда от прямолинейного движения под действием силы Лоренца невелико, поэтому можно записать следующее соотношение между длиной свободного пробега  $\lambda$  и радиусом окружности  $r$  по которой перемещается электрон:

$$\frac{\lambda}{r} = \sin \varphi_H. \quad (13)$$

Учитывая, что  $\lambda = v_d \tau$  и что, согласно (13), время релаксации  $\tau = \frac{\mu_n m_n}{e}$ , находим

$$\lambda = v_d \frac{\mu_n m_n}{e}. \quad (14)$$

Чтобы найти  $r$  воспользуемся условием равенства центробежной силы и силы Лоренца в условиях динамического равновесия:

$$\frac{m_n v_d^2}{r} = e v_d B. \quad (15)$$

Из (15) получаем

$$r = \frac{m_n v_d}{e B}. \quad (16)$$

Подставляя (14) и (16) в (13), находим

$$\sin \varphi_H = \mu_n B. \quad (17)$$

Дрейфовую подвижность электронов  $\mu_n$  находим из выражения для удельного сопротивления

$$\rho = \frac{1}{e n \mu_n}. \quad (18)$$

Откуда

$$\mu_n = \frac{1}{e \rho n}. \quad (19)$$

Концентрацию носителей заряда определяем с помощью формулы для коэффициента Холла (4),

$$n = v_d \frac{A_H}{e R_H}. \quad (20)$$

Учитывая, что Холл-фактор

$$A_H = \frac{\mu_{nH}}{\mu_n} = \frac{3\pi}{8}. \quad (21)$$

Подставляем (19), с учетом (20) и (21), в (17), тогда угол Холла равен

$$\sin \varphi_H = \frac{R_H}{\rho A_H} B = 0,0175. \quad (22)$$

Откуда  $\varphi_H = 1^\circ$ .

**Ответ:**  $\varphi_H = 1^\circ$ .

### Выводы

Для решение задач по физике полупроводников характерны следующие особенности:

- учет большого числа внешних условий;
- знание внутренних параметров данного образца;
- необходимо знание законов изменения параметров полупроводников в зависимости от внешних факторов и внутренних параметров;
- умение выявить параметры, которые в конкретной задаче можно считать неизменными.

### Список использованной литературы:

1. Атаманчук П.С., Кризьков А.А., Мендерецький В.В. Збірник задач з фізики / Під ред. П.С.Атаманчука. – К., Школяр, 1996. – 304 с.
2. Недеогло Д.Д. Сборник задач по физике полупроводников / Недеогло Д.Д., Никорич В.З.; Молдавский гос. ун-т. Физический фак. Каф. Прикладной физики и информатики. – Кишинэу. – 2003. – 116 с.

In the article the features of decision of tasks are indicated on physics of semiconductors, consisting of that the decision of every task requires additional description of terms, which a semiconductor and applications of those theoretical positions which take into account these terms is in. Kinetic effects are examined in semiconductors. Effect of Hall is described, it is resulted decision of task on determination of corner of Hall

**Key words:** A decision of tasks is Semiconductor. Kinetic effects. Effect of Hall.

Отримано: 27.06.2009

УДК 378.147.091.31

**І. М. Бендера**

*Подільський державний аграрно-технічний університет*

## ТЕОРІЯ І МЕТОДИКА ОРГАНІЗАЦІЇ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТІВ АГРОІНЖЕНЕРНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ

Наведені результати теоретичних експериментальних досліджень ефективності впровадження сучасних наскрізних форм організації самостійної роботи студентів аграрно-інженерних спеціальностей.

**Ключові слова:** наскрізна самостійна робота, мотивація, планування, рейтинг-оцінювання, паспортизація, моделі, механізми активізації, педагогічний експеримент.

**Актуальність теми.** Соціально-економічні зміни у житті українського суспільства пов'язані із входженням нашої країни у Європейську спільноту, позитивно впливаючи на процеси модернізації національної освіти.

Одним із найефективніших засобів адаптації людини до сучасного життя є освіта як організований педагогічний процес пізнання, розвитку, спілкування і творчості. У світі склалися дві системи освіти: підтримувальна та інноваційна. Підтримувальна спрямована на підготовку людини до розв'язання повсякденних проблем, підтримання активної життєдіяльності. Інноваційна освіта орієнтується на майбутнє і пов'язана з підготовкою тих, хто навчається, до використання методів прогнозування, моделювання, проектування в житті та професійній діяльності, самостійного підходу до розв'язання будь-якої наукової, соціальної, технічної чи життєвої проблеми, формування уміння розуміти проблеми, що постають, мислити, аналізувати. Стан і темпи аграрного виробництва, особливості професійної діяльності інженера-аграрника нині потребують, щоб навчання у вищій школі не тільки глибоко розкривало сутність і зміст

усталених принципів сучасної науки, але формувало активне володіння цими принципами. Тому для вищої школи першочерговим завданням є максимальний розвиток у студентів умінь самостійно застосовувати основні принципи і закони аграрної інженерії в практичній діяльності та сформувати основи сучасного наукового пізнання, зорієнтованого на потреби життя й виробництва, яке забезпечило б можливість активної і творчої діяльності молодій людині в громадському і виробничому житті у майбутньому.

Проблеми планування організації та контролю самостійної роботи відобразили у наукових дослідженнях такі відомі вчені, як: Р.С.Гуревич, О.Е.Коваленко, Л.М.Журавська, В.А.Козаков, П.І.Підкасистий, А.М.Алексюк, М.М.Солдатенко, Ю.Ф.Зінковський, В.Ф.Орлов, В.І.Астахова, О.Г.Романовський [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]. Проте проблеми організації самостійної роботи студентів вищих навчальних закладів із аграрно-інженерних спеціальностей в умовах кредитно-модульної системи, шляхи її активізації, заходи зі створення прозорої і доступної для самостійного вивчення матеріально-інформаційної бази, психологічні ас-