

В. З. Никорич¹, Д. Д. Недеогло¹, О. А. Голбан¹, О. В. Куликова², А. О. Губанова³

¹Молдавский государственный университет

²Институт прикладной физики АН Молдовы

³Каменец-Подольский национальный университет им. Ивана Огиенко

ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОМАГНИТНЫХ ЭФФЕКТОВ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ В РАМКАХ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ЯВЛЕНИЯМ ПЕРЕНОСА

В статье рассматриваются аспекты использования лабораторных работ с целью формирования у студентов исследовательских навыков. Приведена теория вопроса, методика постановки эксперимента и пути анализа экспериментальных результатов.

Ключевые слова: термомагнитные эффекты, лабораторная работа.

Введение. Широкое применение полупроводников в современной электронике требует достаточно глубокого знания его параметров (проводимость, концентрация и подвижность носителей заряда), которые, в свою очередь, зависят от температуры. Характер зависимости этих параметров от температуры во многих случаях определяется механизмами рассеяния носителей заряда, которые могут быть не только различны в различных интервалах температур, но также могут действовать одновременно, что значительно осложняет задачу исследователя. Это определяет **актуальность** изучения эффектов, позволяющих идентифицировать механизмы рассеяния заряда в полупроводниках.

Достоверную информацию об этих механизмах в широком интервале температур позволяет получить исследование явлений переноса. К таким исследованиям относится изучение температурных зависимостей: эффекта Холла и проводимости [1], термоэлектрического эффекта (эффект Зеебека), а также поперечного и продольного термомагнитных эффектов Нернста-Эттинггаузена (НЕ) [2].

Данная работа осуществляется в рамках лабораторий по исследованию явлений переноса. Обычно студент проводит все лабораторные работы на образцах одного и того же материала, что позволяет сравнить и обсудить результаты, полученные при изучении различных эффектов. Для выполнения лабораторной работы студенту предлагается поставить эксперимент по изучению термомагнитного эффекта в интервале температур 77-420 К. При выполнении работы необходимо: изучить теорию вопроса и особенности проведения эксперимента, выполнить измерения, построить необходимые графики и затем их проанализировать.

Целью выполнения лабораторных работ является поиск более эффективных методов обучения, которые заключаются в формировании как экспериментальных навыков, так и умения анализировать полученные результаты, привлекая знание теории.

Теория вопроса. Если полупроводник, вдоль которого создается градиент температур, помещают в поперечное этому градиенту магнитное поле, то в полупроводнике возникает разность потенциалов, направленная либо перпендикулярно градиенту температур и магнитному полю (поперечный термомагнитный эффект), либо вдоль градиента температур (продольный термомагнитный эффект).

В данной работе остановимся на рассмотрении только поперечного термомагнитного эффекта НЕ. Обычно образец для исследований имеет форму параллелепипеда. Конфигурация эффекта представлена на рис. 1. Если градиент температур dT/dx направлен вдоль оси OX , а магнитное поле B_z – вдоль оси OZ , то электрическое поле НЕ, возникающее в направлении OY , определяется следующим выражением

$$E_y = Q^\perp \frac{dT}{dx} B_z, \quad (1)$$

где Q^\perp – коэффициент поперечного эффекта НЕ.

Важным моментом является тот факт, что величина этого эффекта в различных материалах может отличаться на несколько порядков, знак возникающей разности потенциалов не зависит от типа проводимости образца и, кроме того, может изменяться при изменении температуры.

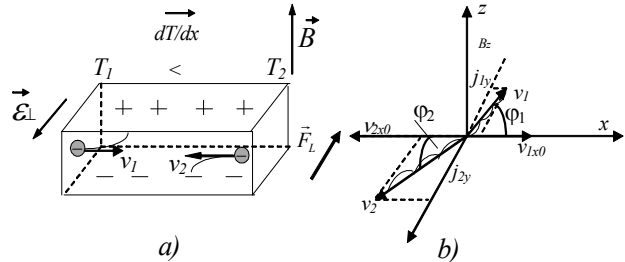


Рис. 1. Возникновение поперечной э.д.с. НЕ.

Покажем, что знак эффекта НЕ определяется механизмом рассеяния носителей заряда. Предположим, что образец имеет n – тип проводимости (рис. 1, а). Наличие градиента температур приводит к диффузии «теплых» электронов со скоростью v_{2x0} от более горячего конца образца к холодному и «холодных» электронов со скоростью v_{1x0} к более горячему (ноль в индексе указывает на отсутствие магнитного поля). Очевидно, что между скоростями верно соотношение $v_{2x0} > v_{1x0}$, но в состоянии динамического равновесия ток в направлении оси OX отсутствует и определяется соотношением

$$j_x = -(en_1v_{1x0} - en_2v_{2x0}) = 0, \quad (2)$$

где n_2 и n_1 – концентрации «теплых» и «холодных» электронов, соответственно. Так как потоки электронов в обоих направлениях равны, то можно предположить, что диффузия осуществляется электронами, движущимися с некоторой средней скоростью \bar{v}_x и имеющими некоторую среднюю концентрацию \bar{n} , т.е.

$$en_2v_{2x0} = en_1v_{1x0} = e\bar{n}\bar{v}_x. \quad (3)$$

При включении в направлении оси OZ магнитного поля с индукцией B_z в направлении оси OY начинает действовать сила Лоренца

$$\vec{F}_L = \pm e[\vec{v}, \vec{B}], \quad (4)$$

и (согласно правилу левой руки, учитывая знак минус в (4) для электронов) «теплые» электроны отклоняются в направлении оси OY , а «холодные» – в противоположном этой оси направлении (рис. 1, б). Так как скорости электронов различны, радиусы кривизны траектории «теплых» и «холодных» электронов также будут различны и, если не принимать во внимание влияние механизма рассеяния, будут отличаться углы их отклонения (углы Холла ϕ_2 и ϕ_1) от направления первоначального движения. В результате, потоки электронов к боковым сторонам образца будут различны и вдоль оси OY возникнет электрический ток

$$j_y = -j_{1y} + j_{2y} = -(en_1v_{1y} - en_2v_{2y}) = en_2v_{2x} \operatorname{tg} \phi_2 - en_1v_{1x} \operatorname{tg} \phi_1. \quad (5)$$

В слабых магнитных полях углы Холла малы, поэтому можно считать

$$\operatorname{tg} \phi_1 \approx \phi_1 \text{ и } \operatorname{tg} \phi_2 \approx \phi_2. \quad (6)$$

При наступлении состояния динамического равновесия потоки электронов вдоль оси OX , как и в случае отсутствия магнитного поля, становятся равными. Следовательно, плотность тока, учитывая (3), равна

$$j_y = en_2v_{2x} \phi_2 - en_1v_{1x} \phi_1 = e\bar{n}\bar{v}_x(\phi_2 - \phi_1). \quad (7)$$

Согласно (7) направление тока j_y зависит от значений углов Холла ϕ_2 и ϕ_1 : если $\phi_2 > \phi_1$ ток j_y будет ориентирован в направлении оси OY , если $\phi_1 > \phi_2$ – в обратном направлении. Этот ток приводит к разделению и накоплению заря-

дов на бокових гранях образца и, следовательно, возникновению э.д.с. Аккумуляция зарядов имеет место до тех пор, пока сила возникающего электрического поля не станет равной силе Лоренца. Между боковыми гранями полупроводника устанавливается разность потенциалов, называемая э.д.с. поперечного эффекта НЕ. Очевидно, что напряженность электрического поля НЕ

$$\mathcal{E}_y \sim -j_y \sim e \bar{n} \bar{v}_x (\varphi_1 - \varphi_2). \quad (8)$$

Учитывая, что холловский угол равен

$$\varphi = \mu B, \quad (9)$$

а подвижность
$$\mu = \frac{e\tau}{m}, \quad (10)$$

получаем
$$\mathcal{E}_y \sim e^2 \bar{n} \bar{v}_x \frac{B}{m} (\tau_1 - \tau_2), \quad (11)$$

где время релаксации

$$\tau = \lambda/v. \quad (12)$$

Согласно (11) знак электрического поля НЕ не зависит от типа носителей заряда (содержит e^2). В случае параболического закона дисперсии ($E \sim k^2$) независимо от механизма рассеяния носителей заряда время релаксации зависит от энергии по степенному закону и длина свободного пробега может быть представлена следующим выражением

$$\lambda = \lambda_0(T) E^r, \quad (13)$$

где $\lambda_0(T)$ и r определяются механизмом рассеяния ($r = 0$ – при рассеянии на акустических фононах; $r = 1$ – в случае оптических фононов при $T > \theta_D$; $r = 1/2$ – в случае оптических фононов при $T < \theta_D$ или рассеянии на нейтральной примеси; $r = 2$ – при рассеянии на ионизированной примеси).

Подставляя (13) в (11) и принимая во внимание (12), определим поле НЕ

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_y &\sim e^2 \bar{n} \bar{v}_x \frac{B}{m} \lambda_0 \left(\frac{E_1^r}{v_1} - \frac{E_2^r}{v_2} \right) \sim \\ &\sim e^2 \bar{n} \bar{v}_x \frac{B}{m} \lambda_0 \left[\frac{(mv_1^2/2)^r}{v_1} - \frac{(mv_2^2/2)^r}{v_2} \right] \sim \\ &\sim Const (v_1^{2r-1} - v_2^{2r-1}). \end{aligned} \quad (14)$$

Таким образом, отклонение «теплых» и «холодных» электронов в магнитном поле определяется значением коэффициента r .

Если $r = 0$ (т.е. $r < 1/2$), что имеет место при рассеянии на акустических фононах, электрическое поле НЕ, согласно (14), положительно

$$\mathcal{E}_y \sim Const (v_1^{-1} - v_2^{-1}) > 0, \quad (15)$$

(так как $v_1 < v_2$), т.е. направлено вдоль OY .

Если $r > 1/2$ (рассеяние на оптических фононах при $T > \theta_D$ и на ионизированной примеси) электрическое поле НЕ отрицательно.

В случае, когда $r = 1/2$, в каждом элементе объема образца «теплые» и «холодные» электроны образуют электрические поля, которые взаимно компенсируют друг друга и эффект НЕ равен нулю.

Проведение эксперимента. Студенту предлагается образец в форме параллелепипеда (обычно это Ge, Si или InSb). С помощью микроскопа проводятся измерения длины и расстояния между боковыми гранями образца, где будут установлены зонды 3-5 и 4-6 (рис. 2). Последние используются для измерения э.д.с. НЕ и расчета напряженности электрического поля \mathcal{E}_y (для более точных измерений используются две пары контактов).

Сначала необходимо определить тип проводимости образца (по эффекту Зеебека [3]), что позволит выбрать материал для омического контакта. Если образец имеет n -тип проводимости, то для изготовления контактов используется индий, которым припаиваются к образцу тонкие проволоочки. Если образец имеет p -тип проводимости, то для контактов используется химически осажденные золото или медь, а затем индием припаиваются проволоочки для контактов. Для создания градиента температур образец

зажимается между блоками 1 и 2, в которые вмонтированы нагреватели. Температура T_1 и T_2 контролируется с помощью термпар, плотно прижатых к образцу. Таким образом, учитывая размеры образца, проводят измерения градиента температуры $\frac{dT}{dx}$, который не должен превышать

10-15°C (в противном случае его распределение вдоль образца будет неравномерным) и оставаться постоянным в процессе измерений. Используя (1), рассчитывают коэффициент НЕ Q^\perp , поведение которого при изменении температуры повторяет характер изменения электрического поля НЕ, поэтому при изучении температурных зависимостей удобно пользоваться \mathcal{E}_y .

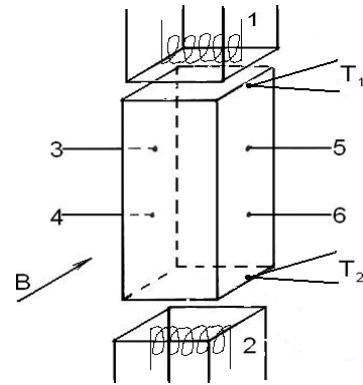


Рис. 2. Расположение контактов на образце

Обсуждение результатов. При анализе температурной зависимости э.д.с. поперечного эффекта НЕ необходимо учитывать влияние нескольких факторов. Так, характер зависимости $\mathcal{E}_y(T)$ в значительной мере определяется энергетическим спектром носителей заряда, механизмами рассеяния, а также является особенно чувствительным в появлении неосновных носителей заряда, в результате чего в области температур со смешанной проводимостью э.д.с. поперечного эффекта НЕ, как правило, имеет отрицательный знак. Поэтому для качественного анализа полученных экспериментальных результатов необходимо четко идентифицировать вид проводимости (примесная, смешанная или собственная), который имеет место в исследованном интервале температур. Проще всего эту информацию можно получить из температурных зависимостей концентрации, другими словами, из эффекта Холла.

Рассмотрим один конкретный случай (рис. 3), учитывая, что исследования проведены в слабых магнитных полях ($\mu B \ll 1$).

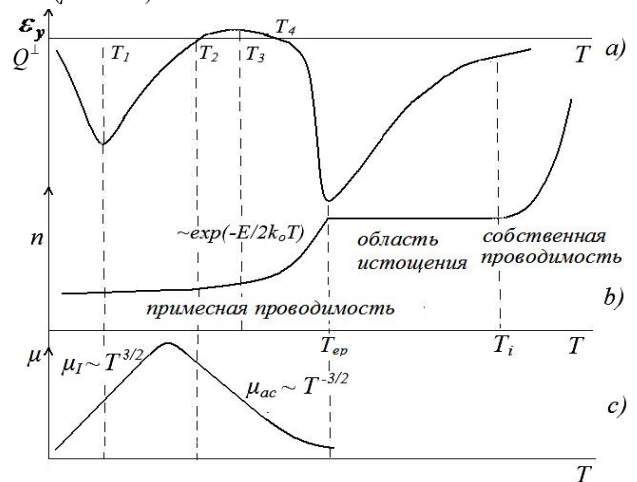


Рис. 3. Зависимость электрического поля НЕ (а), концентрации (б) и подвижности (с) от температуры

Важным свойством коэффициента поперечного эффекта НЕ в слабых магнитных полях является тот факт, что Q^\perp представляет собой постоянную величину

$$Q^{\pm} = \left(\frac{1}{2} - r \right) a_r \frac{k_0}{e} \mu = \text{Const}, \quad (16)$$

где a_r – в данном случае, постоянный параметр определяемый механизмом рассеяния. При анализе температурных зависимостей $\mathcal{E}_y(T)$ воспользуемся выражением (1) с учетом (16), а именно

$$\mathcal{E}_y = \left(\frac{1}{2} - r \right) a_r \frac{k_0}{e} \frac{dT}{dx} \mu B_z. \quad (17)$$

Считаем, что при низких температурах рассеяние носителей заряда имеет место в основном на ионизированной примеси ($r=2$) и \mathcal{E}_y имеет отрицательный знак. С ростом температуры до T_1 величина электрического поля НЕ растет (по модулю) пропорционально росту подвижности по закону $\mu \sim T^{3/2}$ (рис. 3, с).

Затем в интервале температур от T_1 до T_2 наблюдается уменьшение значения \mathcal{E}_y и смена знака с отрицательного на положительный (при $T > T_2$). Это связано с тем, что рост температуры приводит в увеличению доли рассеяния на акустических фонах. При преобладании этого механизма рассеяния \mathcal{E}_y принимает положительные значения ($r=0$), а подвижность с ростом температуры уменьшается согласно $\mu \sim T^{-3/2}$. При этом на характер зависимости $\mathcal{E}_y(T)$ практически не влияет слабое изменение концентрации с ростом температуры (рис. 3 а и б). Однако, при $T > T_3$ активация электронов с донорных уровней в зону проводимости становится более существенной, рост концентрации становится более значительным и \mathcal{E}_y опять принимает отрицательные значения (при $T > T_4$), возрастая по модулю по экспоненциальному закону вплоть до температуры истощения примеси T_{ep} . В дальнейшем, рост температуры приводит к уменьшению э.д.с. НЕ, что объясняется уменьшением подвижности при рассеянии на акустических фонах, при том, что концентрация практически не изменяется. Появление второго типа носителей заряда (в данном случае дырок) и переход к собственной проводимости ($T \approx T_i$) не

изменяет ход температурной зависимости \mathcal{E}_y , значение которой стремится к нулю. Действительно, в области собственной проводимости с обоих концов образца в диффузии «теплых» и «холодных» носителей заряда участвуют одновременно как электроны, так и дырки, которые компенсируют друг друга и поперечный эффект НЕ становится ничтожно малым.

Заключение. Выполнение данной лабораторной работы способствует закреплению теоретического материала по специальному курсу «Электронная теория полупроводников». Студент самостоятельно выполняет эксперимент, проводит необходимые расчеты, строит графики и анализирует их. Такой подход к изучению свойств полупроводника расширяет профессиональный кругозор студента, позволяет видеть проблему в комплексе и последовательно приводит его к самостоятельной выработке стратегии исследований и нахождению оптимального решения поставленной задачи. Полученные знания помогают будущему специалисту в области физики полупроводников более глубоко осмыслить суть явлений и закономерностей и, следовательно, свободно ориентироваться в новых идеях, технологиях и концепциях.

Список использованной литературы:

1. Орешкин П.Г. Физика полупроводников и диэлектриков / П.Г. Орешкин. – М. : Высшая школа, 1977. – 448 с.
2. Цидильковский И.М. Термомагнитные явления в полупроводниках / И.М. Цидильковский. – М. : Физматгиз, 1960. – 396 с.
3. Недеогло Д.Д. Сборник задач по физике полупроводников / Д.Д. Недеогло, В.З. Никорич ; Молдавский госуниверситет. – Кишинэу, 2003. – 116 с.

In the article aspects of the usage of the laboratory research in order to formation of the investigation capabilities of the students are discussed. There are the theory, experimental set up method and the ways of the discussion of the experimental results are described.

Key words: Thermomagnetic effects, Laboratory research.

Отримано: 29.08.2011

УДК 372.853

І. В. Оленюк

Гусятинський коледж Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя

РЕАЛІЗАЦІЯ УПРАВЛІНСЬКИХ ВПЛИВІВ НА ДОСЯГНЕННЯ ПРОГНОЗОВАНОГО РІВНЯ ЯКОСТІ ЗНАТЬ В ХОДІ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ З ФІЗИКИ

В статті розкриваються особливості управління навчально-пізнавальною діяльністю студентів вищих навчальних закладах I-II рівнів акредитації в ході лабораторних занять з фізики через контроль, коригування, ліквідацію прогалин у знаннях, через виконання експериментальних завдань еталонного рівня та досягнення прогнозованого еталонного рівня якості знань.

Ключові слова: контроль, тестування, особистісно-діяльнісні вимірники якості знань, управління навчально-пізнавальною діяльністю, рівні якості знань

Підвищення якості та поглиблення професійної підготовки фахівців, як одне із важливих завдань вищої школи, можливе при впровадженні нових методів та технологій у навчальний процес, у цілому, так і в процес навчання фізики, зокрема.

У вищих навчальних закладах I-II рівнів акредитації, які здійснюють підготовку молодших спеціалістів за технічними спеціальностями, базисний зміст фізики є необхідною складовою вивчення предметів професійно-технічного циклу. Звідси й слідує необхідність досягнення якості набутих студентами фізичних знань, їх мобільності, можливості їх практичного використання.

Процес оволодіння фізичними знаннями має складну і багатоступінчасту структуру, проте кожний її елемент має бути органічно поєднаний з попереднім і слугувати необхідним підґрунтям для наступних. Тому так важливо визначити рівні якості знань, яких повинен досягти студент в результаті вивчення тієї чи іншої теми. Це можна зробити, врахувавши внутрі- та міжпредметні зв'язки конкретного навчального матеріалу та орієнтуючись на інтегративні тенденції навчальних дисциплін, що вивчаються в даному навчальному закладі, згідно освітньо-професійної програми підготовки молодшого спеціаліста, і на основі цього сформулювати цільову програму з фізики. Саме вона визначає не тільки зміст фізики, а й окреслює рівні якості знань, яких повинен досягти студент, вивчивши ту чи іншу тему. До того ж, врахувавши, що на досягнення цього рівня проводиться робота на лекціях, практичних заняттях з розв'язування задач, лабораторних роботах, викладач, сформувавши цільову програму кожного заняття, визначає рівні, яких повинен досягти студент в ході кожного із них. Послідовність у вивченні навчального матеріалу та його застосуванні (від лекції до практичного заняття, а від останнього – до лабораторного заняття) визначає поетапне просування до визначеного програмою рівня якості знань з даної теми.

При окресленні еталонних вимог якості знань студентів [2]: нижчого рівня (навчальний процес тільки починає здійснюватись) – це заучування знань (ЗЗ), наслідування (НС), розуміння головного (РГ); оптимального рівня (найбільш повно відповідає сприятливому протіканню процесу) – повне воло-

При окресленні еталонних вимог якості знань студентів [2]: нижчого рівня (навчальний процес тільки починає здійснюватись) – це заучування знань (ЗЗ), наслідування (НС), розуміння головного (РГ); оптимального рівня (найбільш повно відповідає сприятливому протіканню процесу) – повне воло-