

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ BRIEF REPORTS

УДК 537.311.322

Зондовые измерения эффекта Холла в анизотропных пластинах и пленках

А.А. Заворотный, В.В. Филиппов

Липецкий государственный педагогический университет

Probe Measurement of Hall Effect in Anisotropic Semiconductor Finite Size Plates

A.A. Zavorotniy, V.V. Filippov

На основе математической модели теоретически обоснованы зондовые измерения коэффициента Холла в прямоугольных анизотропных полупроводниковых пластинах. Даны практические рекомендации по использованию предложенной методики.

Ключевые слова: анизотропный полупроводник; ЭДС Холла; двухзондовый метод.

In the work based on a mathematical model the technique of the Hall coefficient measurement in square anisotropic semiconductor plates and films the probe technique has been justified. As a result of the qualitative analysis the mathematical expressions for the Hall field potential in the sample have been obtained. The recommendations for using the offered measurement techniques have been given.

Keywords: anisotropic semiconductor, Hall electromotive difference of potential, two-probe method.

Зондовые методики измерений ЭДС Холла весьма удобны при практических исследованиях полупроводников. Эти методики описаны в работах [1, 2]. Однако отсутствует методика для зондового измерения эффекта Холла в анизотропных образцах.

Рассмотрим анизотропный образец прямоугольной формы длиной a и шириной b , вырезанный под углом θ к главным направлениям тензора электропроводности, расположенный в поперечном относительно слабого магнитного поля (рис.1). Постоянный электрический ток силой I_{12} протекает через контакты 1 и 2 на противоположных гранях образца, симметрично на высоте $b/2$. Контакты 1, 2 имеют ширину $2c$ и толщину d , совпадающую с толщиной образца.

Согласно теоретическим результатам работ [3, 4] найдем разность потенциалов ε_H (ЭДС Холла)

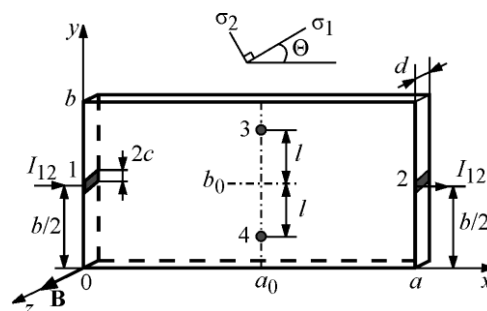


Рис.1. Расположение токовых (1, 2) и измерительных (3, 4) контактов на образце

между измерительными зондами 3 и 4, равноудаленными на расстояние l от центра измерительного пробника, координаты которого (a_0, b_0) :

$$\varepsilon_H = \frac{I_{12} R_z B}{d} Q,$$

$$Q = \frac{2l}{b} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{(-1)^n}{n} \frac{\sin(\beta_n c)}{\beta_n c} \frac{\sin(\beta_n l)}{\text{sh}(\beta_n \gamma_2 a)} \times \right.$$

$$\left. \times [\text{sh}(\beta_n \gamma_2 a_0) \cdot \cos(\beta_n (b_0 - \gamma_1 (a_0 - a))) + \text{sh}(\beta_n \gamma_2 (a - a_0)) \cdot \cos(\beta_n (b_0 - \gamma_1 a_0))] \right\}, \quad (1)$$

где $\gamma_1 = \sigma_{xy} / \sigma_{xx}$, $\gamma_2 = \sigma_0 / \sigma_{xx}$, $\sigma_0 = \sqrt{\sigma_1 \sigma_2} = \sqrt{\sigma_{xx} \sigma_{yy} - \sigma_{xy}^2}$, $\beta_n = 2\pi n / b$.

Ряд в (1) сходится достаточно хорошо, и при вычислениях величины Q с погрешностью расчета не более 1% достаточно ограничиться первыми $n = 50$ слагаемыми.

Влияние возникающего в анизотропных полупроводниках поперечного напряжения анизотропии [3, 4] и неэквипотенциальности положения зондов 3, 4 на результаты измерений можно исключить, определяя ЭДС Холла как разность напряжений между зондами в магнитном поле и при его отсутствии: $\varepsilon_H = U_{34}^B - U_{34}^0$.

Рассмотрим теоретическую зависимость множителя Q от относительного расстояния $2l/b$ между измерительными зондами при различных углах анизотропии Θ на примере двух анизотропных монокристаллов A_2B_5 : $CdAs_2$ ($\sigma_2/\sigma_1 = 4$) и $ZnAs_2$ ($\sigma_2/\sigma_1 = 10$) [5, 6] (рис.2). Образцы и контакты имеют следующие параметры: $a/b = 1,5$; $c = 0,1b$; $a_0 = 0,5a$; $b_0 = 0,5b$. При $\sigma_2/\sigma_1 = 4$ и углах $\Theta < \pi/2$ параметр Q близок к линейной зависимости $Q = 2l/b$. Это хорошо согласуется с результатами для изотропных материалов [7]. При сильной анизотропии (такой, как у $ZnAs_2$) зависимость Q от l становится существенно нелинейной, поэтому при измерении эффекта Холла в таких образцах необходимо учитывать влияние ряда в (1).

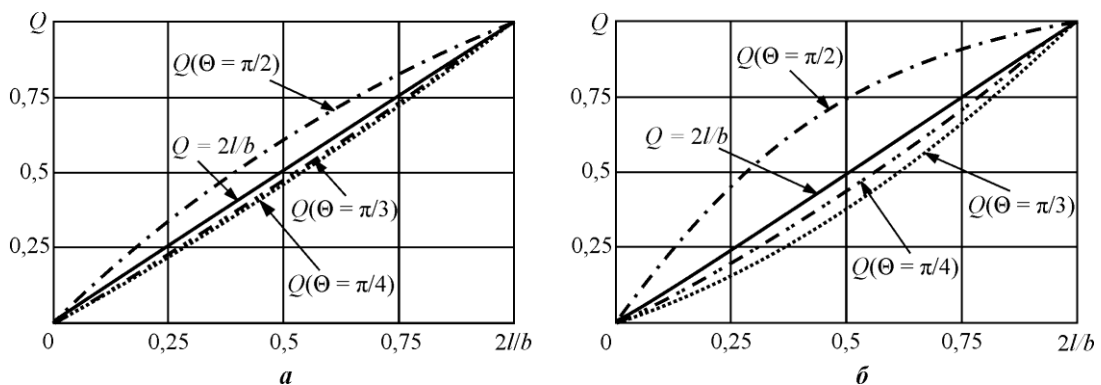


Рис.2. Зависимость множителя Q от расстояния между измерительными зондами при различных углах анизотропии Θ для $\sigma_2/\sigma_1 = 4$ (а) и $\sigma_2/\sigma_1 = 10$ (б)

На рис.3 представлены рассчитанные зависимости множителя Q от изменения положения координаты центра измерительного пробника вдоль оси Oy для различных углов анизотропии Θ . Из графиков видно, что при углах $0 \leq \Theta \leq \pi/3$ (для $CdAs_2$) или $0 \leq \Theta \leq \pi/6$ (для $ZnAs_2$) значения Q с погрешностью менее 5% отличаются от величины $Q = 2l/b$, что позволяет варьировать положение пробника вдоль оси Oy .

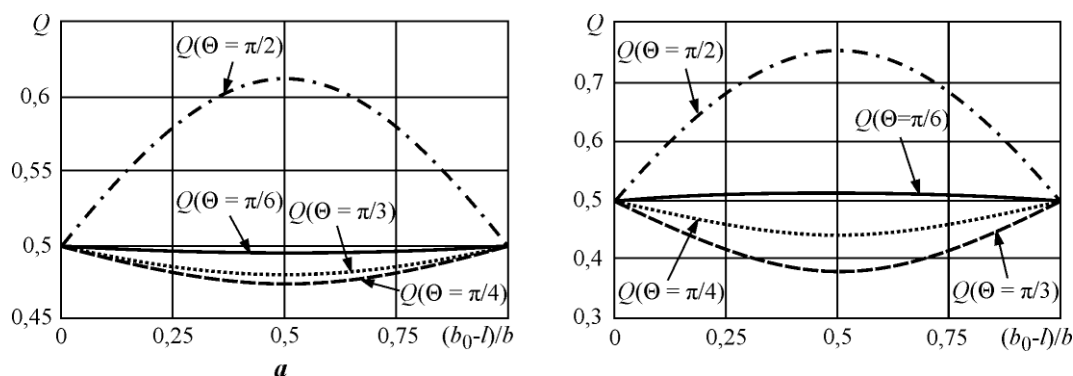


Рис.3. Зависимость множителя Q от координаты центра измерительного пробника b_0 ($a_0 = 0,5a$) при $2l = 0,5b$ для $\sigma_2/\sigma_1 = 4$ (а) и $\sigma_2/\sigma_1 = 10$ (б)

Из проведенного анализа выражения (1) и общей теории [3, 4] можно предложить следующую методику зондового измерения эффекта Холла в анизотропных образцах.

1. Расположить контакты 1–4 на образце согласно рис.1. Определить расстояние $2l$ между зондами. Для упрощения вычислений при углах поворота образца $\Theta \neq 0$ разместить измерительный пробник в средней части полупроводникового образца, вблизи линий $a_0 = 0,5a$ и $b_0 = 0,5b$.

2. Измерить разность потенциалов U_{34}^B между зондами 3, 4 при токе I_{12} и включенном магнитном поле индукцией B . Чтобы снизить влияние других гальваномагнитных эффектов следует проводить четыре измерения U_{34}^B : при двух направлениях электрического тока и двух направлениях магнитного поля, затем усреднить полученные величин [1, 2] аналогично ГОСТ 25948-83 и 16153-80:

$$\varepsilon_H = \langle U_{34}^B \rangle = [U_{34}^B(+I_{12}, +B) - U_{34}^B(+I_{12}, -B) - U_{34}^B(-I_{12}, +B) + U_{34}^B(-I_{12}, -B)]/4.$$

Данное усреднение позволяет также учесть неэквипотенциальность положения зондов 3 и 4.

3. Определить значение поправочного множителя Q согласно формуле (1) по известным параметрам $a, b, d, c, a_0, b_0, l, \sigma_1, \sigma_2, \Theta$. При малых размерах токовых контактов ($2c < 0,1b$) в выражении (1) можно считать $\sin(\beta_n c)/\beta_n c \approx 1$.

4. Вычислить коэффициент Холла по формуле

$$R_Z = \frac{\varepsilon_H d}{I_{12} B Q}. \quad (4)$$

В рамках данной методики возможны измерения необходимых напряжений и токов в течение нескольких секунд при малых электрических полях (~ 5 мА), что значительно уменьшает влияние сопутствующих эффекту Холла гальваномагнитных явлений [1]. Результирующая погрешность нахождения коэффициента Холла определяется стандартными погрешностями при холловских измерениях [1, 2] и не превосходит 10%.

Предложенная методика измерения коэффициента Холла имеет ряд преимуществ: не требуется создания специальной тестовой структуры с омическими контактами; достаточно проста в исполнении и расчетах; является экспрессной; дает дополнительную возможность контролировать однородность материала по результатам измерения ЭДС Холла.

Проведена экспериментальная проверка применяемого распределения потенциала [3, 4]. Получено хорошее совпадение теоретической модели с экспериментальными результатами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (госзадание по НИР № 2271).

Литература

1. **Кучис Е.В.** Гальваномагнитные эффекты и методы их исследования. – М.: Радио и связь, 1990. – 264 с.
2. **Батавин В.В., Концевой Ю.А., Федорович Ю.В.** Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур. – М.: Радио и связь, 1985. – 264 с.
3. **Филиппов В.В., Поляков Н.Н., Мицук С.В.** Восьмизондовый метод совместных измерений электропроводности и коэффициента Холла анизотропных полупроводниковых пленок // Изв. вузов. Электроника. – 2006. – №4. – С. 81–87.
4. **Филиппов В.В., Бормонтов Е.Н.** Особенности распределения электрических полей в пластинах анизотропных полупроводников в поперечном магнитном поле // Физика и техника полупроводников. – 2013. – Т. 47. – Вып. 7. – С. 874–881.
5. **Маренкин С.Ф., Раухман А.М., Пищиков Д.И.** Электрические и оптические свойства диарсенидов кадмия и цинка // Неорганические материалы. – 1992. – Т. 28. – № 9. – С. 1813–1828.
6. **Маренкин С.Ф., Раухман А.М., Лазарев В.Б.** Анизотропия электрических свойств монокристаллов CdAs₂ // Неорганические материалы. – 1989. – Т. 25. – №8. – С. 1240–1243.
7. **Поляков Н.Н., Заворотний А.А., Филиппов В.В.** Об измерении коэффициента Холла и электропроводности полупроводников зондовым методом // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2014. – Т. 80. – № 6. – С. 41–44.

Поступило 16 июля 2014 г.

Заворотний Анатолий Анатольевич – аспирант кафедры физики Липецкого государственного педагогического университета. *Область научных интересов:* исследование кинетических и транспортных свойств полупроводниковых пленок и наноструктур, моделирование распределения электрических полей в анизотропных полупроводниковых кристаллах и пленках. **E-mail:** aazavorotniy@mail.ru

Филиппов Владимир Владимирович – доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой физики Липецкого государственного педагогического университета. *Область научных интересов:* исследование кинетических и контактных свойств неоднородных и анизотропных полупроводниковых материалов, компьютерное моделирование электронного переноса в этих материалах.