

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ АНИЗОТРОПНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН И ПЛЕНОК

© 2013 В. В. Филиппов¹, Н. Н. Поляков¹, Е. Н. Бормонтов²

¹Липецкий государственный педагогический университет, ул. Ленина, 42, 398020 Липецк, Россия

²Воронежский государственный университет, Университетская пл., 1, 394006 Воронеж, Россия
e-mail: wwfilippow@mail.ru

Поступила в редакцию 01.04.2013 г.

Аннотация. Представлен быстрый способ определения компонент тензора удельной электропроводности тонких полупроводниковых пластин на основе известного четырехзондового метода. Предложенный метод теоретически обоснован путем решения соответствующих краевых задач электродинамики, отличается простотой измерений и расчётов, не требует применения сложной аппаратуры, выполнен учет граничных условий.

Ключевые слова: анизотропный полупроводник, пленка, распределение потенциала, электропроводность.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время подробно разработаны методы измерения характеристик полупроводниковых материалов, не обладающих анизотропией физических свойств [1, 2]. В то же время в современной электронике все большее применение находят перспективные полупроводниковые соединения типа A_2B_5 и A_2B_6 [3, 4]. В кристаллах данных систем из-за сложности строения решеток наблюдается анизотропия электрических, термоэлектрических и гальваномагнитных свойств. В ряде случаев наблюдается стимулированная анизотропия электрических свойств у атомарных полупроводников под давлением или под влиянием внешнего поля [5, 6]. В связи с этим разработка методов исследования характеристик анизотропных полупроводников становится все более актуальной.

В данной работе предложена методика измерений компонент тензора удельной электропроводности анизотропных пластин и пленок четырехзондовым методом с линейным расположением зондов, проведена оценка применимости данного метода и погрешности измерений.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ

Первоначально определим распределение потенциала при зондовых измерениях на постоянном токе. В установившемся режиме при отсутствии

источников и стоков зарядов векторы плотности тока \mathbf{j} , напряженности поля \mathbf{E} и потенциал ϕ связаны соотношениями [7]:

$$\mathbf{j} = \hat{\sigma} \mathbf{E}, \quad \mathbf{E} = \text{grad } \phi, \quad \text{div } \mathbf{j} = 0, \quad (1)$$

где $\hat{\sigma}$ — симметричный тензор удельной электропроводности. В рассматриваемом случае образец ориентирован так, что тензор $\hat{\sigma}$ имеет диагональный вид:

$$\hat{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Отсюда получаем дифференциальное уравнение для потенциала:

$$\sigma_x \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \sigma_y \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \sigma_z \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0. \quad (3)$$

Граничные условия следуют из требования, что нормальная составляющая плотности тока на поверхности образца всюду равна нулю кроме точек под токовыми электродами [7]. Для расположения зондов согласно рис. 1а граничные условия принимают вид:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_{x=0,a} &= 0, \quad \left. \frac{\partial \phi}{\partial y} \right|_{y=0,b} = 0, \quad \left. \frac{\partial \phi}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial \phi}{\partial z} \right|_{z=d} = \\ &= \frac{I_{14}}{\sigma_z} [\delta(x-x_1)\delta(y-y_1) - \\ &\quad - \delta(x-x_4)\delta(y-y_4)], \end{aligned} \quad (4)$$

где $\delta(x)$ — дельта-функция Дирака, использование которой оправдано для токовых зондов с малой площадью входных сечений; $(x_1, y_1), (x_4, y_4)$ — координаты токовых зондов.

Данная краевая задача (3), (4) решается методом разделения переменных. В результате окончательное выражение для потенциала ϕ на поверхности образца представимо в виде двойного ряда Фурье:

$$\phi = -\frac{4I_{14}}{\sigma_z ab} \sum_{k,n=0}^{\infty} \left\{ A_{nk} \cdot \frac{\text{ch}(\eta_{kn}(d-z))}{\eta_{kn} \text{sh}(\eta_{kn}d)} \times \right. \\ \left. \times \cos(\alpha_k x) \cdot \cos(\beta_n y) \right\}, \quad (5)$$

где

$$A_{nk} = \Theta_n \Theta_k \begin{pmatrix} \cos(\alpha_k x_1) \cdot \cos(\beta_n y_1) - \\ - \cos(\alpha_k x_4) \cdot \cos(\beta_n y_4) \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$\alpha_k = \frac{\pi k}{a}, \quad \beta_n = \frac{\pi n}{b}, \quad \eta_{kn} = \sqrt{\frac{\sigma_x}{\sigma_z} \alpha_k^2 + \frac{\sigma_y}{\sigma_z} \beta_n^2}, \\ \Theta_{i\{i=k,n\}} = \begin{cases} 1, & i \neq 0; \\ 0.5, & i = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Для определения компонент тензора электропроводности σ_x, σ_y необходимо провести два независимых измерения токов и напряжений при различных положениях зондового пробника. Первоначально зондовый пробник с линейным положением зондов расположим на поверхности образца вдоль линии, параллельной оси x , произведем измерения тока I_{14} и разности потенциалов U_{23} (рис. 1а: $x_1 = a/2 - 3s/2, x_4 = a/2 + 3s/2, y_1 = y_4 = b/2$). Полученное распределение потенциала позволяет найти теоретическую разность потенциалов между зондами 2 и 3:

$$U_{23} = \frac{I_{14} a}{\sigma_x b d} L_1, \quad (8)$$

$$L_1 = \frac{16\sigma_x}{a^2\sigma_z} \sum_{\substack{k=1,3,5,\dots \\ n=0,2,4,\dots}} \left[\Theta_n \frac{\text{cth}(\eta_{kn}d)}{\eta_{kn}} \sin(\alpha_k s/2) \times \right. \\ \left. \times \sin(3\alpha_k s/2) \right]. \quad (9)$$

При значении отношения $d/s < 0.7$ образец можно считать тонким с погрешностью расчетов менее 2% [1, 2]. В этом случае можно произвести в (9) суммирование по « k » [8]. В результате в приближении тонких образцов получаем выражение для множителя L_1 , входящего в формулу (8):

$$L_1 = \frac{s}{a} + 2 \sum_{n=2,4,6,\dots} \left[\frac{\text{ch}(\gamma \beta_n(a-s)) - \text{ch}(\gamma \beta_n s) + \text{ch}(2\gamma \beta_n s) - \text{ch}(\gamma \beta_n(a-2s))}{\gamma \beta_n a \cdot \text{sh}(\gamma \beta_n a)} \right]. \quad (10)$$

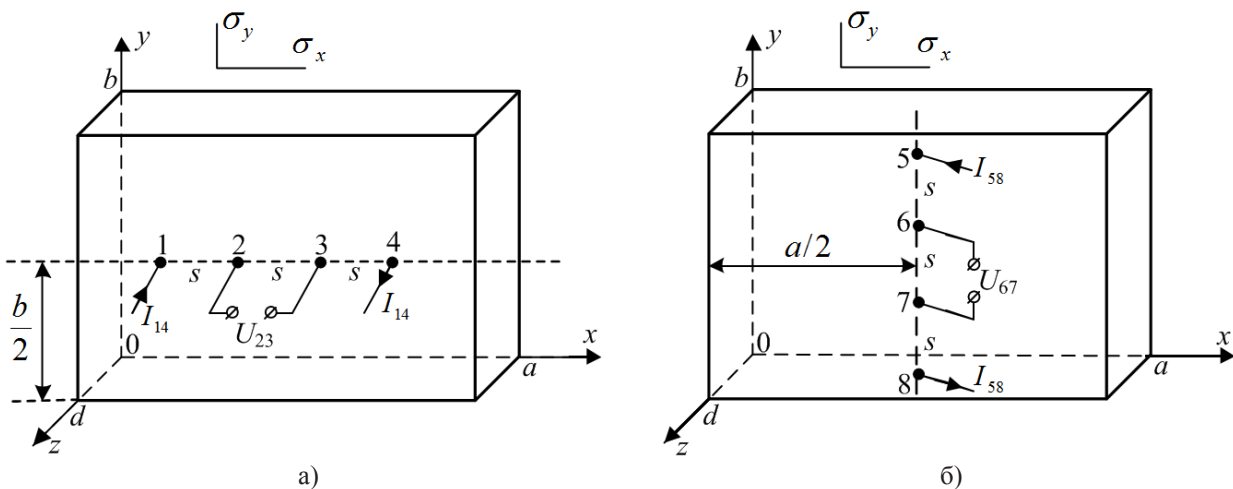


Рис. 1. Схема расположения зондов на прямоугольном образце

Здесь $\gamma = \sqrt{\sigma_y / \sigma_x}$ — параметр анизотропии электропроводности.

Для второго измерения расположим зондовый пробник на той же грани образца вдоль линии, параллельной оси y (рис. 1b: $x_5 = x_8 = a/2$, $y_5 = b/2 + 3s/2$, $y_8 = b/2 - 3s/2$), измеряем ток I_{58} и разность потенциалов U_{67} . Аналогично получаем выражение для взаимосвязи тока I_{58} и напряжения U_{67} :

$$U_{67} = \frac{I_{58}}{\sigma_y} \frac{b}{ad} L_2, \quad (11)$$

где L_2 — соответствующий поправочный множитель для данного случая расположения зондов. В случае тонких образцов получаем:

$$L_2 = \frac{s}{b} + 2 \sum_{k=2,4,6,\dots} \left[\frac{\text{ch}(\alpha_k(b-s)/\gamma) - \text{ch}(\alpha_k s/\gamma) + \text{ch}(2\alpha_k s/\gamma) - \text{ch}(\alpha_k(b-2s)/\gamma)}{(\alpha_k b/\gamma) \cdot \text{sh}(\alpha_k b/\gamma)} \right]. \quad (12)$$

По данным измерений определяем величину безразмерного параметра Q :

$$Q = \frac{R_1}{R_2} = \frac{U_{23} / I_{14}}{U_{67} / I_{58}}, \quad (13)$$

который понадобится для расчета значения γ , необходимого для вычисления компонент тензора удельной электропроводности.

Согласно выражениям (8) и (11), «теоретическая» зависимость $Q(\gamma)$ имеет вид:

$$Q(\gamma) = \left(\frac{\gamma a}{b} \right)^2 \frac{L_1}{L_2}. \quad (14)$$

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Таким образом, предлагаемая методика измерения компонент тензора удельной электропроводности кристалла или пленки сводится к следующему.

1. При некотором значении тока I_{14} измерить напряжение U_{23} , затем, используя тот же линейный зондовый пробник при значении тока I_{58} , измерить напряжение U_{67} (рис. 1).

2. Вычислить из эксперимента величину параметра $Q = R_1/R_2$ согласно выражению (13).

3. По графику зависимости $Q(\gamma)$ определить значение параметра γ путем сопоставления «теоретического» и экспериментального значений параметра Q (полученных по формулам (14) и (13) соответственно). Для некоторых значений отношений a/s , b/s нами была построена зависимость Q от параметра анизотропии γ и представлена на рис. 2.

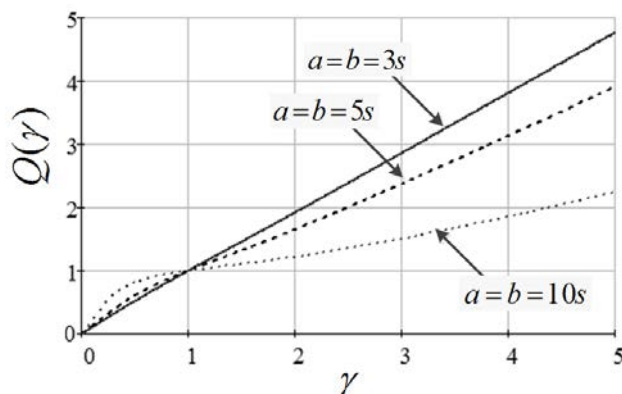


Рис. 2. График зависимости величины параметра Q от коэффициента анизотропии электропроводности γ при $a=b$ и различных значениях s

3. Определить значения поправочных множителей L_1 и L_2 по формулам (10) и (12).

4. Вычислить значения компонент тензора электропроводности σ_x и σ_y по формулам:

$$\sigma_x = \frac{I_{14}}{U_{23}} \frac{a}{db} L_1, \quad \sigma_y = \frac{I_{58}}{U_{67}} \frac{b}{da} L_2. \quad (15)$$

Представляет практический интерес определение величин поправочных множителей L_1 и L_2 для неограниченного образца ($a/s \rightarrow \infty$, $b/s \rightarrow \infty$). В результате вычисления соответствующих пределов получено, что в случае бесконечной пластины выражения (15) представляются в виде:

$$\sigma_x = 0.2206 \frac{I_{14}}{\gamma \cdot d \cdot U_{23}}, \quad \sigma_y = 0.2206 \frac{\gamma \cdot I_{58}}{d \cdot U_{67}}. \quad (16)$$

Для изотропных образцов ($\sigma_x = \sigma_y = \sigma$, $\gamma = 1$) получаем известную формулу для удельного сопротивления при измерениях с помощью линейного четырехзондового пробника [1, 2]:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = 4.532 \frac{U_{23}}{I_{14}} d. \quad (17)$$

Таблица. Результаты экспериментальных измерений

Образец	a , mm	b , mm	d , mm	s , mm	σ_x , $\text{Om}^{-1}\times\text{m}^{-1}$		σ_y , $\text{Om}^{-1}\times\text{m}^{-1}$	
					Эксперимент	Контроль	Эксперимент	Контроль
CdAs ₂	19.20	22.50	1.00	3.00	41.34	42.10	8.82	8.90
ZnAs ₂	18.00	20.00	0.85	3.00	2009	2021	509	520

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА. ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Предлагаемая методика определений компонент тензора удельной электропроводности экспериментально проверялась на анизотропных пластинах CdAs₂ и ZnAs₂. В качестве токовых и измерительных контактов использовались прижимные вольфрамовые зонды. Через исследуемые образцы пропускался постоянный электрический ток от стабилизированного источника питания Б5-44, разность потенциалов между измерительными зондами измерялась с помощью вольтметра В2-34, положение измерительных и токовых контактов контролировалось с помощью микроскопа МБС-10. Измерения проводились для каждого образца при трех различных значениях тока. Средние значения компонент тензора электропроводности приведены в таблице. Для сравнения в таблице представлены также контрольные (контр.) значения этих компонент, измеренные стандартным двухзондовым методом [1, 2].

Преимущество предложенного метода состоит в том, что для его применения не требуется создания омических контактов к образцу, нанесение которых вызывает определённые сложности, а также зачастую приводит к невозможности дальней-

шего использования полупроводникового кристалла. Погрешность предлагаемой методики в основном определяется погрешностью известного четырехзондового метода [1, 2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батавин В. В., Концевой Ю. А., Федорович Ю. В. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур. М.: Радио и связь, 1985.
2. Павлов Л. П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов. М.: Высшая школа, 1987.
3. Маренкин С. Ф., Трухан В. М. Фосфиды, арсениды цинка и кадмия. Минск: Вараскин, 2010.
4. Снарский А. А., Пальти А. М., Ащеулов А. А. // ФТП. 1997. Т. 31. № 11. С. 1281.
5. Неизвестный И. Г., Гридчин В. А. // Микроэлектроника. 2009. Т. 38. № 2. С. 88.
6. Баранский П. И., Клочков В. П., Потыкевич И. В. Полупроводниковая электроника. Киев: Наукова думка, 1975.
7. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. С. 130.
8. Прудников А. П., Брычков Ю. А., Маричев О. И. Интегралы и ряды. Элементарные функции. М.: Наука, 1981. Т. 1. С. 730.
9. Градштейн И. С., Рыжик И. М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М.: Наука, 1971. С. 54.

Филиппов Владимир Владимирович — к. ф.-м. н., доцент, заведующий кафедрой физики, Липецкий государственный педагогический университет; тел.: (4742) -328385, e-mail: wwfilippow@mail.ru

Поляков Николай Николаевич — д. ф.-м. н., профессор кафедры физики, Липецкий государственный педагогический университет; тел.: (4742) 328385, e-mail: nnpolakov@mail.ru

Бормонтов Евгений Николаевич — д. ф.-м. н., профессор, заведующий кафедрой физики полупроводников и микроэлектроники, Воронежский государственный университет; тел.: (4732) 208633, e-mail: me144@phys.vsu.ru

Filippov Vladimir V. — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Head of the Physics Department, Lipetsk State Pedagogical University; tel.: (4742) 328385, e-mail: wwfilippow@mail.ru

Polyakov Nikolay N. — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor of the Physics Department, Lipetsk State Pedagogical University, tel.: (4742) 328385, e-mail: nnpolakov@mail.ru

Bormontov Evgeniy N. — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Physics of Semiconductor and Microelectronics Department, Voronezh State University, tel.: (473) -2208633, e-mail: me144@phys.vsu.ru