

The background of the entire page is a dense field of blue, three-dimensional cubes. Each cube is rendered with a high level of detail, showing sharp edges and bright highlights that give them a metallic or crystalline appearance. The cubes are scattered across the page, creating a textured, geometric pattern. The lighting is bright, causing some cubes to appear almost white at their highlights, while others are in deep shadow, emphasizing their three-dimensional form.

Д.А. Шутов, Д.В. Ситанов

*Методы исследования  
материалов и структур*

*Лабораторный практикум*

Иваново, 2009

Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
Ивановский государственный химико-технологический университет

**Д. А. ШУТОВ, Д. В. СИТАНОВ**

**МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ  
МАТЕРИАЛОВ И СТРУКТУР**

**Лабораторный практикум**

Иваново 2009

УДК 621.382

Шутов Д.А. Методы исследований материалов и структур: лабораторный практикум /Д.А. Шутов, Д.В. Ситанов; Иван. гос. хим.–технол. ун-т. – Иваново, 2009. - 84 с.

Лабораторный практикум содержит описание и порядок выполнения пяти базовых лабораторных работ по курсу «Методы исследований материалов и структур», входит в комплект базовых учебных пособий по данному курсу, читаемому студентам специальности 210100 «Микроэлектроника и твердотельная электроника» и посвящен изучению методов исследования электрофизических параметров, структуры, состава материалов и структур микроэлектроники.

Каждое описание лабораторной работы содержит подробное теоретическое введение, описание лабораторного оборудования, порядок выполнения работы, лабораторное задание и перечень вопросов для самоподготовки.

Авторы благодарны кафедре технологии приборов и материалов электронной техники за часть графического материала и теоретических выкладок. Отдельная благодарность доц. Титову В.А. и ст. пр. Иванову А.Н. за разработку лабораторных стендов к работам №№ 4 и 5, соответственно.

Печатается по решению редакционно-издательского совета ГОУ ВПО Ивановского государственного химико-технологического университета

Рецензенты:

кафедра математики, экономической информатики и вычислительной техники Ивановского филиала Российского государственного торгово-экономического университета;  
кандидат химических наук В.В. Васильев (Ивановская государственная текстильная академия)

© Шутов Д.А., Ситанов Д.В.  
© Ивановский государственный  
химико-технологический  
университет, 2009

## СОДЕРЖАНИЕ

Порядок прохождения практикума.....	4
Требования к отчету по работе .....	5
<b>Лабораторная работа 1.</b> Измерение удельного сопротивления полупроводниковых материалов и структур с использованием 4-х зондовой методики. Определение типа проводимости полупроводников по знаку термоЭДС с использованием термозонда.....	6
<b>Лабораторная работа 2.</b> Определение концентрации и знака основных носителей заряда в полупроводнике с использованием эффекта Холла.....	41
<b>Лабораторная работа 3.</b> Изучение профиля распределения концентрации свободных носителей зарядов по толщине полупроводника вольт-фарадным методом .....	52
<b>Лабораторная работа 4.</b> Исследование диэлектрических характеристик материалов .....	64
<b>Лабораторная работа 5.</b> Определение времени жизни и диффузионной длины неосновных носителей заряда .....	74
Список литературы .....	83

## Порядок прохождения практикума

Лабораторный практикум выполняется в соответствии с графиком и календарным планом, которые составляются на каждый учебный год. С содержанием и планом прохождения практикума, требованиями к выполнению работ, ведению лабораторного журнала и оформлению отчетов студенты знакомятся на первом вводном занятии. На этом же занятии проводится инструктаж по технике безопасности при работе в лаборатории и выдаются задания на выполнение первой лабораторной работы.

Лабораторные работы выполняются либо индивидуально, либо бригадами в составе не более двух студентов.

Необходимая для выполнения работы информация, схемы установок, результаты измерений и их предварительной обработки заносятся в индивидуальный лабораторный журнал, который ведется каждым студентом независимо от его вхождения в бригады в отдельной тетради. По окончании каждой лабораторной работы журнал подписывается преподавателем.

В конце каждого занятия студент должен получить индивидуальное задание для подготовки к очередной лабораторной работе.

Подготовка к выполнению лабораторной работы включает в себя:

- изучение теоретического материала по краткому теоретическому введению, конспектам лекций и учебной литературе, указанной в конце практикума;
- уяснение идеи метода измерений и принципов работы лабораторной установки;
- уяснение всех измеряемых в процессе работы величин, а также процедур их дальнейшей обработки для достижения конечной цели работы.

В лабораторный журнал в процессе подготовки к работе заносится следующее:

- название лабораторной задачи;
- цель работы;
- в нескольких фразах необходимо сформулировать идею метода измерений;
- привести основные расчетные формулы;
- изобразить схему экспериментальной установки с указанием основных элементов;
- привести перечень измеряемых в ходе работы величин, их обозначения и размерности.

А

Перед каждой работой студент проходит краткое собеседование с преподавателем для выяснения уровня готовности к выполнению работы. Результаты собеседования учитываются при выставлении оценки за выполнение работы.

В процессе выполнения работы необходимо:

- ознакомиться с экспериментальной установкой, правилами эксплуатации конкретных измерительных приборов;
- указать на схеме в лабораторном журнале марки используемых измерительных приборов;
- составить план проведения измерений и согласовать его с преподавателем;
- подготовить в лабораторном журнале таблицы для записи результатов измерений;
- выполнить все запланированные измерения, включая опыты, направленные на проверку воспроизводимости результатов. При этом результаты измерений заносятся в лабораторный журнал без каких-либо преобразований и расчетов;
- произвести обработку результатов; построить графики (если это необходимо); предъявить результаты измерений и расчетов преподавателю. Все расчеты заносятся в лабораторный журнал.

### **Требования к отчету по работе**

Отчет по работе предоставляется на следующем после выполнения данной лабораторной работы занятии. Он оформляется не в лабораторном журнале, а на отдельных листах. Отчет должен включать в себя название работы; ее цель; краткое теоретическое введение; схему экспериментальной установки с указанием типов измерительных приборов; первичные результаты измерений в виде таблиц; графики, отражающие полученные зависимости; результаты обработки первичных данных и примеры вычислений; выводы; список использованной литературы. Полученные в работе результаты следует сравнить с данными, представленными в приложениях к работе или в соответствующих справочниках. Каждый отчет должен быть подписан автором.

После проверки отчета преподавателем студент сдает коллоквиум по выполненной работе, на котором обсуждаются как теоретические вопросы, так и процедуры измерений и обработки результатов, анализируются источники погрешностей.

За отчет по работе и за коллоквиум выставляются отдельные оценки.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1  
**ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И СТРУКТУР С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ 4-Х ЗОНДОВОЙ МЕТОДИКИ.  
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТИПА ПРОВОДИМОСТИ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВ ПО ЗНАКУ ТЕРМОЭДС С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕРМОЗОНДА**

**Цели работы:**

1. Изучить теоретические основы зондовых методов для определения величины удельного сопротивления полупроводниковых материалов и структур.
2. Более подробно ознакомиться с четырехзондовой методикой измерения величины удельного сопротивления полупроводниковых образцов.
3. Определить удельное сопротивление исследуемого образца с использованием четырехзондовой методики.

**Теоретическое введение**

В технологии микроэлектроники для определения величины удельного сопротивления полупроводниковых материалов и структур широкое распространение получили зондовые методы. Их преимущественное применение обусловлено:

- высокими метрологическими показателями;
- простотой конструкции измерительных средств;
- возможностью проведения измерений удельного сопротивления объемных монокристаллов, полупроводниковых пластин, а также полупроводниковых слоев, в том числе, диффузионных, ионно-имплантированных и эпитаксиальных.

Зондовые методы применяются для измерения удельного сопротивления *монокристаллов и пластин* в диапазоне  $10^{-4}$ – $5 \cdot 10^3$  Ом·см, *эпитаксиальных и диффузионных* слоев в диапазоне поверхностного сопротивления  $1$ – $5 \cdot 10^5$  Ом.

**1. Четырехзондовый метод**

Четырехзондовый метод основан на явлении растекания тока в точке контакта металлического острия зонда с полупроводником. На поверхности образца, чаще всего вдоль одной линии размещаются четыре зонда (рис. 1). Через одну пару контактов (чаще всего это крайние зонды 1, 4) пропускают ток  $I$ , а между двумя другими контактами (внутренними зондами 2, 3) измеряют разность потенциалов  $U$ .

В общем случае расположение зондов на поверхности образца может быть произвольным, однако существуют некоторые общие рекомендации, согласно которым удобно располагать зонды либо в линию на одинаковом расстоянии друг от друга, либо по вершинам квадрата. Причем желательно располагать зонды от торцов образца на расстоянии не менее пятикратного расстояния между зондами.

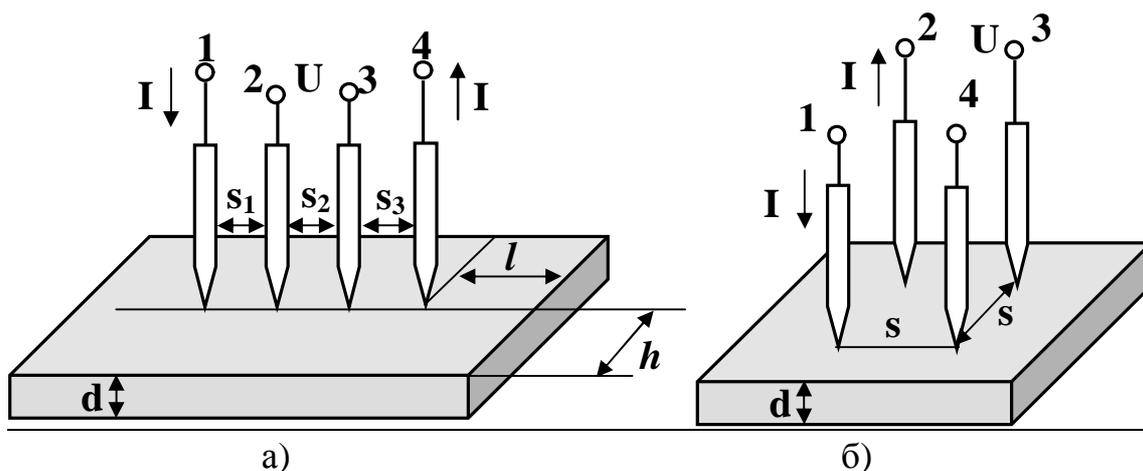


Рис.1. Схемы расположения зондов при реализации четырехзондовой методики:

- а - расположение зондов 1-4 в линию,
- б - расположение зондов 1-4 по вершинам квадрата.

### 1.1 Объемные монокристаллы

К объемным монокристаллам чаще всего относят полупроводниковые слитки, а в общем случае образцы для которых характерны следующие соотношения геометрических размеров по отношению к расстоянию между зондами:  $d, l, h \gg s_1, s_2, s_3$  (рис. 1). Растекание тока в полупроводнике в данном случае будет иметь сферическую симметрию.

Определим значение электрического потенциала в точке соприкосновения зонда с полупроводниковой пластиной, выразив его через величину удельного сопротивления материала  $\rho$ .

Итак,

$$E = dj/dx = Jr, \tag{1}$$

где  $E$  – напряженность электрического поля;

$j$  – электрический потенциал;

$x$  – пространственная координата;

$J$  – плотность тока;

$r$  – удельное сопротивление.

При этом плотность сферически распространяющегося тока в полупроводнике будет равна:

$$J = I / 1/2 S_{сферы} = I / 2pr^2. \quad (2)$$

То есть,

$$dj / dr = - Ir / 2pr^2. \quad (3)$$

Знак минус в уравнении (3) свидетельствует об уменьшении потенциала при продвижении в глубь полупроводника. Стоит отметить, что потенциал на поверхности полупроводника может быть найден путем интегрирования выражения (3):

$$j_1 = \int_{r_0}^r \left(-\frac{Ir}{2px^2}\right) dx = \frac{Ir}{2pr} + A, \quad (4)$$

здесь в постоянную «А» кроме всех прочих постоянных вошла величина  $r_0$ , как начальная координата, соответствующая поверхности полупроводника.

Потенциалы в точках контакта внутренних (потенциальных) зондов с полупроводником вычисляются сложением потенциалов от обоих токовых зондов с учетом их знака, определяемого направлением тока (см. рис. 1):

$$j_2 = (Ir/2p)[1/s_1 - 1/(s_2 + s_3)] + A, \quad (5)$$

$$j_3 = (Ir/2p)[1/(s_1 + s_2) - 1/s_3] + A.$$

Таким образом, разность потенциалов между внутренними зондами  $U$  будет равна:

$$U = j_2 - j_3 = (Ir/2p)[1/s_1 - 1/(s_2 + s_3) + 1/s_3 - 1/(s_1 + s_2)]. \quad (6)$$

Из выражения (6) напрямую следует основная расчетная формула четырехзондового метода:

$$r = \frac{2p}{1/s_1 - 1/(s_2 + s_3) + 1/s_3 - 1/(s_1 + s_2)} \frac{U}{I}. \quad (7)$$

На практике межзондовые расстояния делают равными, то есть обеспечивают условие  $s_1 = s_2 = s_3 = s$ , и формула метода упрощается:

$$r = 2psU / I = F_i^* sU / I \quad (8)$$

Для пропускания тока и измерения напряжения можно использовать различные пары зондов, при этом множитель  $F_i^*$  будет принимать разные значения. В таблице 1 приведены поправочные коэффициенты  $F_i^*$  для всех возможных комбинаций включения токовых и потенциальных зондов, располагаемых в линию.

Из таблицы 1 видно, что предпочтительными являются первые две схемы включений, так как они обеспечивают наибольшее регистрируемое напряжение.

В ряде случаев, когда необходимо проводить измерения на образцах малого размера, используют более компактную схему размещения зондов по вершинам квадрата со стороной  $s$  (см. рис. 1,б). Ток пропускают через зонды, образующие одну из сторон квадрата, например 1 и 2, а разность потенциалов измеряют на другой паре зондов 3 и 4.

Таблица 1

Значения поправочных коэффициентов  $F_i^*$

Зонды		Коэффициент $F_i^*$
токовые	потенциальные	
1-4	2-3	$2\pi$
2-3	1-4	$2\pi$
1-3	2-4	$3\pi$
2-4	1-3	$3\pi$
1-2	3-4	$6\pi$
3-4	1-2	$6\pi$

Удельное сопротивление в этом случае при измерении на полубесконечных образцах вычисляют по формуле:

$$r = (2ps / (2 - \sqrt{2})) \frac{U}{I}. \tag{9}$$

Приведенные выше формулы четырехзондового метода справедливы только для массивного (полубесконечного) образца. На практике измеряемые образцы имеют конечные геометрические размеры. Если удаленность зондов от границ образца становится соизмеримой с межзондовым расстоянием, то измеренное удельное сопротивление образца будет содержать ошибку. В общем случае для вычисления истинного значения удельного сопротивления в формулы четырехзондового метода следует вводить поправочные коэффициенты, учитывающие геометрические размеры образца (см. раздел “Погрешности четырехзондовых методов”).

### 1.2. Полупроводниковые пластины

Если толщина образца мала по сравнению с межзондовым расстоянием, т. е.  $d \ll s$ , а границы его удалены в бесконечность -  $h, l \gg s$ , то растекание тока в полупроводнике имеет цилиндрическую симметрию, и выражение для плотности тока запишется следующим образом:

$$J = I / S_{\text{цилиндра}} = I / 2prd, \tag{10}$$