

Методы исследований

Методы исследований наноматериалов и наноструктур

Методы исследований наноматериалов и наноструктур

Компетенции ОП

ОПК-6: Способность осуществлять поиск, хранение, обработку и анализ информации из различных источников и баз данных, представлять ее в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий.

ПК-2: Способность аргументированно выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники различного функционального назначения.

ПК-3: Готовность анализировать и систематизировать результаты исследований, представлять материалы в виде научных отчетов, публикаций презентаций.

Подкомпетенции, формируемые в дисциплине

ПК-6.1: Способность производить поиск и обработку информации на основе знания методов и методик, использованных при проведении исследований по требуемой тематике.

ПК-2.1: Способность выбирать и реализовывать в своей исследовательской деятельности наиболее эффективные методы и методики экспериментального исследования характеристик материалов и элементов интегральных устройств.

ПК-3.1: Готовность проводить анализ экспериментальных результатов и уметь выбирать необходимые данные для их представления их в научно-технических отчетах.

Методы исследований

Система контроля и оценивания

Для оценки успеваемости используется балльная накопительная система.

Баллами оцениваются: выполнение каждого контрольного мероприятия в семестре (в сумме до 45 баллов), посещаемость лекций в течение семестра (в сумме до 16 баллов) и сдача экзамена (до 39 баллов). По сумме баллов выставляется итоговая оценка.

1. Не сдача ДЗ на проверку в установленные сроки приравнивается к неуспешной сдаче этих контрольных мероприятий. За не сданные до конца зачетной недели лабораторную работу или домашнее задание баллы не начисляются.
2. Если балл, полученный за вовремя сданное ДЗ, не устраивает студента, он может в течение недели исправить и вновь сдать ДЗ на проверку (и получить оценку вплоть до максимальной). Если после второй проверки оценка по ДЗ оказалась ниже минимального балла, то при дальнейших пересдачах выше минимального балла за ДЗ получить нельзя.
3. Защита лабораторных работ проводится в течение четырех недель с момента ее проведения. По результатам защиты в рабочую тетрадь выставляется оценка в баллах от 1 до 5, заверенная подписью преподавателя.
4. На зачётной неделе может быть выполнена только одна лабораторная работа, пропущенная по уважительной причине.
5. На зачётной неделе может быть защищена только последняя из выполненных лабораторных работ.

ДЗ – индивидуальное домашнее задание; ПЛ – посещение лекций; ЛР – защита лабораторной работы.

Методы исследований

Структура и график контрольных мероприятий

№ недели	1	2	3	4	5	6	7	8	9					
Контрольное мероприятие	ПЛ	ПЛ	ПЛ	ПЛ	ДЗ1	ПЛ	ЛР1	ПЛ	ДЗ2	ПЛ	ПЛ	ДЗ3	ПЛ	ЛР2
Максимальный балл	1	1	1	1	5	1	5	1	5	1	1	5	1	5
Минимальный балл	0	0	0	0	3	0	3	0	3	0	0	3	0	3

№ недели	10	11	12	13	14	15	16	17	17		Экз.	Сумма		
Контрольное мероприятие	ПЛ	ПЛ	ДЗ4	ПЛ	ПЛ	ЛР3	ПЛ	ПЛ	ПЛ	ДЗ5	ЗЛР4	Экз.		
Максимальный балл	1	1	5	1	1	5	1	1	1	5	5	61	39	100
Минимальный балл	0	0	3	0	0	3	0	0	0	3	3	23	27	50

При выставлении итоговой оценки используется следующая шкала.

Сумма баллов	Оценка
Менее 50	2
50 – 69	3
70 – 85	4
86 – 100	5

Модуль 1. Электрофизические методы измерений

• Измерение удельного сопротивления.

- Удельное сопротивление и удельное поверхностное сопротивление.
- Четырехзондовый метод измерения удельного сопротивления.
- Разновидности четырехзондового метода: метод Ван-дер-Пау; двухзондовый метод.
- Бесконтактный метод.
- Метод сопротивления растекания.
- Сравнение основных характеристик методов измерения удельного сопротивления полупроводниковых структур.
- Современное оборудование для измерения удельного сопротивления.

Модуль 1. Электрофизические методы измерений

• Определение концентрации и подвижности носителей заряда.

- Трехзондовый метод.
- Метод вольтфарадных характеристик контакта металл – полупроводник и электролит - полупроводник.
- Современное оборудования, реализующее методы вольтфарадных характеристик.
- Определение концентрации свободных носителей по оптическому поглощению.
- Эффект Холла.
- Эффект магнитосопротивления.
- Квантовый эффект Холла.
- Современное оборудование для измерения концентрации и подвижности методом эффекта Холла.

Модуль 1. Электрофизические методы измерений

- **Измерение параметров неравновесных носителей заряда.**
- Стационарный метод определения диффузионной длины.
- Метод подвижного светового зонда.
- Метод спада фотопроводимости.
- Метод модуляции проводимости точечного контакта.
- Сравнительные характеристики различных методов.
- Измерение скорости поверхностной рекомбинации.
- Определение дрейфовой подвижности.
- **Тестовый контроль.**
- Тестовые структуры и тестовые ячейки.
- Омические контакты и методы их контроля.

Модуль 1. Электрофизические методы измерений

- **Свойства МДП-структур и методы их исследования.**
- Понятие о МДП-структуре.
- Экспериментальное исследование МДП-структур.
- МДП структуры, используемые для исследований
- Определение параметров МДП-структуры по высокочастотной ВФХ.
- Измерение плотности подвижного заряда в диэлектрике.
- Определение плотности поверхностных состояний на границе полупроводник–диэлектрик.
- Методы определения плотности ловушек в диэлектрике и полупроводнике.
- Современное оборудование для экспериментального исследования МДП-структур.

Модуль 2. Оптические методы измерений.

Измерение толщины тонких слоев в полупроводниковых структурах.

- **Измерение толщин полупроводниковых слоев.**
 - Метод декорирования шлифа.
 - Определение толщины эпитаксиальных слоев по размерам дефектов упаковки;
 - Инфракрасная интерферометрия.
 - Фурье-спектрометрия в инфракрасной области; современное оборудование, реализующее метод ИК Фурье-спектроскопии.
 - Сопоставление различных методов измерения толщины эпитаксиальных слоев.
 - Современное оборудование для измерения толщин полупроводниковых слоев

Модуль 2. Оптические методы измерений. Измерение толщины тонких слоев в полупроводниковых структурах.

- **Измерение толщин диэлектрических слоев.**
- Цветовой метод измерения толщины пленок диэлектриков;
- Метод эллипсометрии.
- Современные эллипсометры.
- **Профилометрия.**
- Профилометрия и ее применение:
- Современные профилометры.
- **Сравнительные характеристики методов определения
толщины**

Модуль 3. Физико-аналитические методы измерений.

- **Методы ионной и электронной спектроскопии для определения химического состава микро- и наноструктур.**
- Методы фотоэлектронной спектроскопии: ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия; рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия.
- Метод Оже спектроскопии.
- Современное оборудование, реализующее метод Оже спектроскопии.
- Масс-спектроскопия вторичных ионов.
- Резерфордское обратное рассеяние.
- Спектроскопия комбинационного рассеяния света.
- Современное оборудование, реализующее методы фотоэлектронной спектроскопии.

Модуль 3. Физико-аналитические методы измерений.

- **Электронная микроскопия.**
- Просвечивающая электронная микроскопия:
 - типы просвечивающих электронных микроскопов;
 - подготовка образцов для просвечивающей электронной микроскопии.
- Растровая электронная микроскопия:
 - типы растровых электронных микроскопов.
 - режимы растровой электронной микроскопии;
 - применение сфокусированного ионного пучка;
 - современные модели электронных микроскопов.

Модуль 3. Физико-аналитические методы измерений.

- **Дифракционные методы.**
- Дифракция рентгеновских лучей:
 - метод Лауэ;
 - метод вращения кристалла;
 - метод Дебая-Шерера.
- Дифракция электронов (электронография на просвет).
- Дифракция медленных электронов.

Методы исследований

Основная литература

- Е.С.Анфалова. Методы измерения параметров полупроводников и полупроводниковых структур. Учебное пособие. Москва 2005.
- К.В.Шалимова. Физика полупроводников. 4-е изд., «Лань», Москва. 2010.
- Г.И.Епифанов. Физика твердого тела. 4-е изд., «Лань», Москва. 2011.
- Зебрев Г.И. Физические основы кремниевой наноэлектроники. Уч. пособие. Физматлит, Москва, 2011.

Методы исследований

Основная литература

- Ищенко А.А., Фетисов Г.В., Асланов Л.А. Нанокремний: свойства, получение, применение, методы исследования и контроля. Физматлит, Москва. 2012.
- И. Е. Скалецкая. Введение в прикладную эллипсометрию. Учебное пособие по курсу «Оптические измерения», Санкт-Петербургский государственный университет инновационных технологий, механики и оптики. Санкт-Петербург. 2007.

Методы исследований

Основная литература

- Эгертон Р.Ф., Физические принципы электронной микроскопии, Техносфера, Москва. 2010.
- Криштал М.М., Сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный анализ. Техносфера, Москва, 2009.
- Семенов Я.С., Лебедев М.П. Практика рентгеноструктурного анализа. Академия, Москва. 2008.
- В.И.Старосельский. Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники: учебн. пособие. М. Юрайт-Издат. 2009.

Методы исследований

Дополнительная литература

- С.М.ЗИ. Физика полупроводниковых приборов. В двух книгах. Москва. «Мир». 1984.
- Л.Н.Павлов. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов. 2-е издание, переработанное и дополненное. Москва, «Высшая школа». 1987.
- В.В.Батавин, Ю.А.Концевой, Ю.В.Федорович. Измерение параметров полупроводниковых материалов. Москва, «Радио и связь». 1985.

Методы исследований

Дополнительная литература

- Кучис Е.В. Методы исследования эффекта Холла. Москва, «Сов. радио», 1974.
- Основы технологии кремниевых интегральных схем. Окисление, диффузия, эпитаксия. Под ред. Р.Бургера и Р.Донована. Москва: «Мир». 1969.
- Измерения и контроль в микроэлектронике. Н.Д. Дубовой, В. И. Осокин, А. С. Очков и др. Под ред. А. А. Сазонова. Москва. Высшая школа, 1984.
- Белл Р.Дж. Введение в Фурье-спектроскопию. Москва, «Мир», 1975.

Методы исследований

Дополнительная литература

- Смирнов, В. И. Неразрушающие методы контроля параметров полупроводниковых материалов и структур. Учебное пособие. Ульяновск. УлГТУ, 2012.
- Ржанов А.В. (отв. ред.), Свиташев К.К., Семенов А. И., Соколов В.К.; Основы эллипсометрии Институт физики полупроводников СО АН СССР. Новосибирск: Наука. 1979.
- Горелик В.С. Комбинационное рассеяние света. Соросовский образовательный журнал, №6, 1997

Четырехзондовый метод измерения удельного сопротивления

Удельное сопротивление и удельное поверхностное сопротивление

Удельное сопротивление полупроводника ρ , содержащего и электроны и дырки

$$\rho = \frac{1}{e(n\mu_n + p\mu_p)}$$

где $e=1.602 \cdot 10^{-19}$ Кл – абсолютное значение заряда электрона, n , p – концентрации электронов и дырок, μ_n , μ_p – подвижности электронов и дырок.

В полупроводнике n-типа проводимости и в полупроводнике p-типа проводимости.

$$\rho_n = \frac{1}{en\mu_n}; \quad \rho_p = \frac{1}{ep\mu_p}$$

В невырожденных полупроводниках в области истощения мелкой донорной или акцепторной примеси $n=N_D$ и $p=N_A$ и

$$\rho_n = \frac{1}{eN_D\mu_n}; \quad \rho_p = \frac{1}{eN_A\mu_p}.$$

Удельное сопротивление и удельное поверхностное сопротивление

Сопротивление R однородно легированного полупроводникового прямоугольного параллелепипеда может быть определено, если известны удельное сопротивление материала ρ , длина l , ширина w и толщина образца d .

$$R = \frac{\rho l}{wd}$$

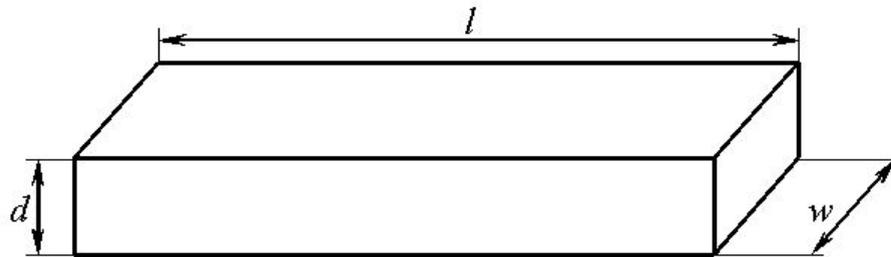


Рис.1.1. Полупроводниковый образец в виде
прямоугольного параллелепипеда

Удельное сопротивление и удельное поверхностное сопротивление

Удельное поверхностное сопротивление R_S , определяемое как сопротивление образца квадратной формы ($l=w$).

$$R_S = \frac{\rho}{d}.$$

Размерность $[R_S]=\text{Ом}/\square$, или же просто Ом. Термин поверхностное сопротивление используется и для неоднородно легированных полупроводниковых слоев.

Поверхностное сопротивление неоднородно легированного полупроводникового слоя n-типа (p-типа) проводимости, изолированного от подложки p-типа (n-типа) проводимости p-n переходом с глубиной залегания x_1 .

$$R_{Sn} = \left[e \int_0^{x_1} n(x) \mu_n (N_D(x)) dx \right]^{-1}, \quad R_{Sp} = \left[e \int_0^{x_1} p(x) \mu_p (N_A(x)) dx \right]^{-1},$$

где $N_D(x)$ – концентрация электрически активных доноров на глубине x , $n(x)$ – концентрация электронов на глубине x , μ_n – подвижность электронов, которая является функцией концентрации электрически активных доноров, $N_A(x)$ – концентрация электрически активных акцепторов на глубине x , $p(x)$ – концентрация дырок на глубине x , μ_p – подвижность дырок, которая является функцией концентрации электрически активных акцепторов.

Зависимости подвижности и удельного сопротивления кремния от концентрации легирующей примеси при комнатной температуре

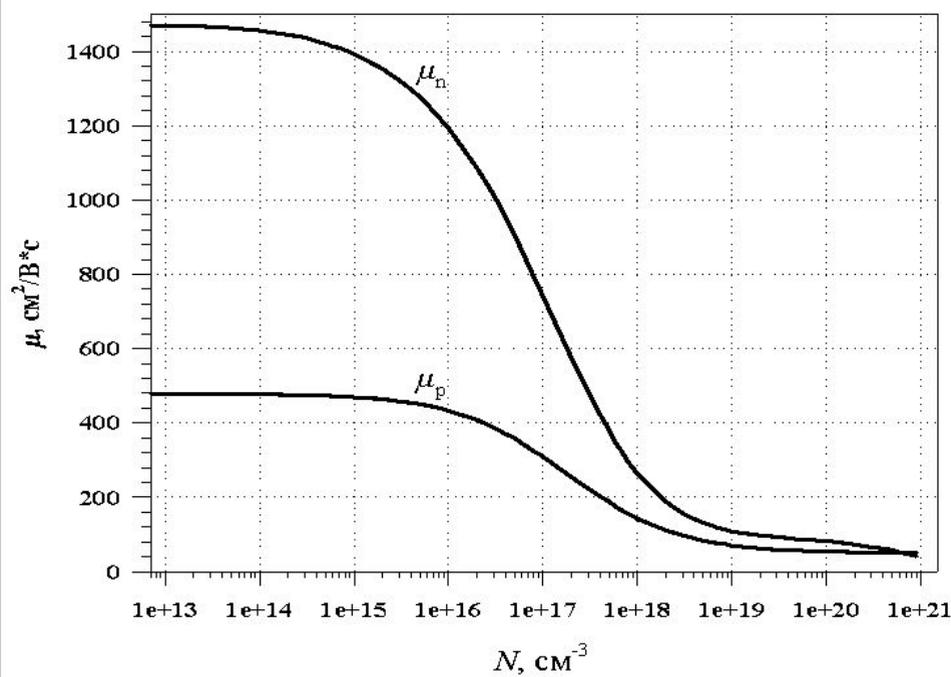


Рис.1.2а. Зависимости дрейфовых подвижностей электронов и дырок в кремнии от концентрации легирующей примеси при комнатной температуре

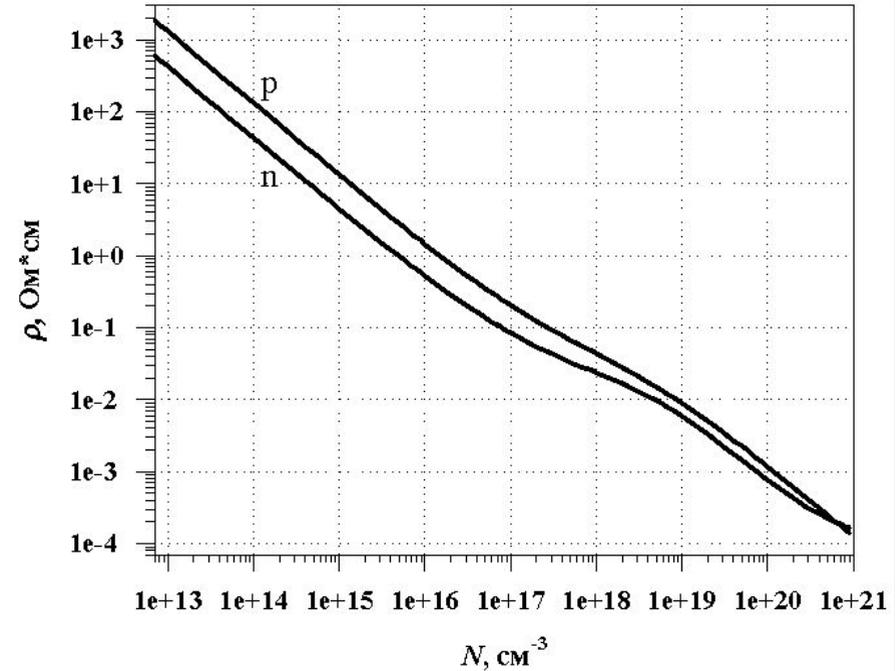


Рис.1.2б. Зависимости удельного сопротивления электронного и дырочного кремния от концентрации легирующей примеси при комнатной температуре

Четырехзондовый метод

На полупроводниковую пластину, размеры которой много больше расстояния между зондами опускают четыре металлических зонда (рис.1.3). Через зонды 1 и 4 пропускают ток $I=I_{14}$, а между зондами 2 и 3 измеряют падение напряжения $V=V_{23}$. Входное сопротивление вольтметра, измеряющего напряжение V_{23} , должно быть достаточно высоким для исключения протекания измерительного тока между зондами 2 и 3. Для ограничения нагрева образца при измерениях надо минимизировать измерительный ток.

Расчет удельного сопротивления ρ по измеренным значениям напряжения V и тока I зависит от геометрии измеряемого образца.

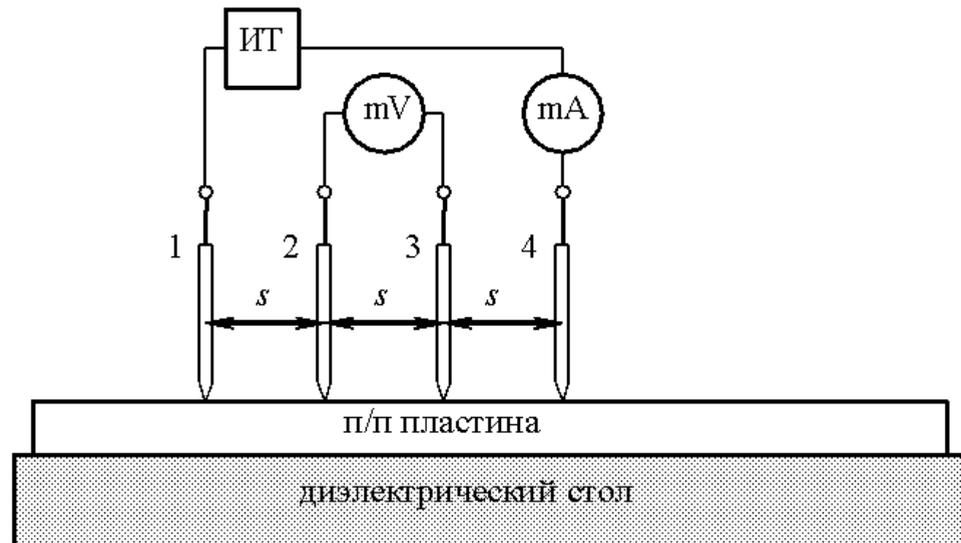


Рис.1.3. Блок-схема макета установки, реализующей четырехзондовый метод

Полубесконечный образец

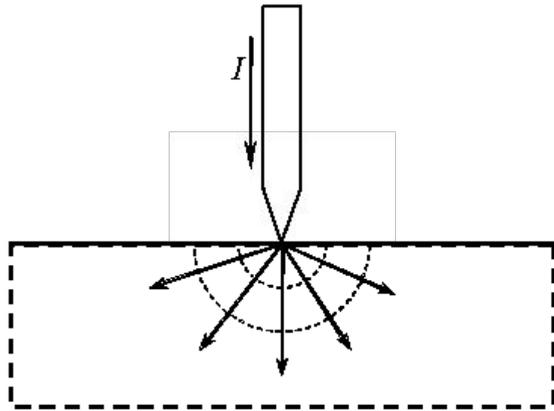


Рис.1.4. Растекание тока от точечного контакта в полубесконечном образце

Распределение потенциала $V(r)$ при растекании тока от точечного металлического контакта с полубесконечным полупроводниковым образцом (рис.1.4) имеет сферическую симметрию и определяется уравнением Лапласа в сферических координатах.

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dV}{dr} \right) = 0.$$

Решение уравнения, удовлетворяющее граничному условию $V_{r \rightarrow \infty} = 0$, имеет вид.

$$V(r) = \frac{C}{r}.$$

Константу C определяем из условия, что напряженность электрического поля E при $r=r_0$ равна

$$E(r_0) = -\frac{dV}{dr}(r_0) = -\frac{C}{r_0^2}.$$

Напряженность электрического поля E связана с током I , растекающимся по поверхности полусферы площадью $2\pi r_0^2$, законом Ома.

$$E(r_0) = j(r_0)\rho = \frac{I}{2\pi r_0^2} \rho.$$

Таким образом,

$$V(r) = \frac{I\rho}{2\pi r}$$

Полубесконечный образец

Зависимость $V(r)$ такая же и при полусферической форме контакта. Потенциал V убывает достаточно быстро при увеличении r , поэтому ток I будет определяться главным образом сопротивлением приконтактной области, размеры которой тем меньше, чем меньше радиус контакта.

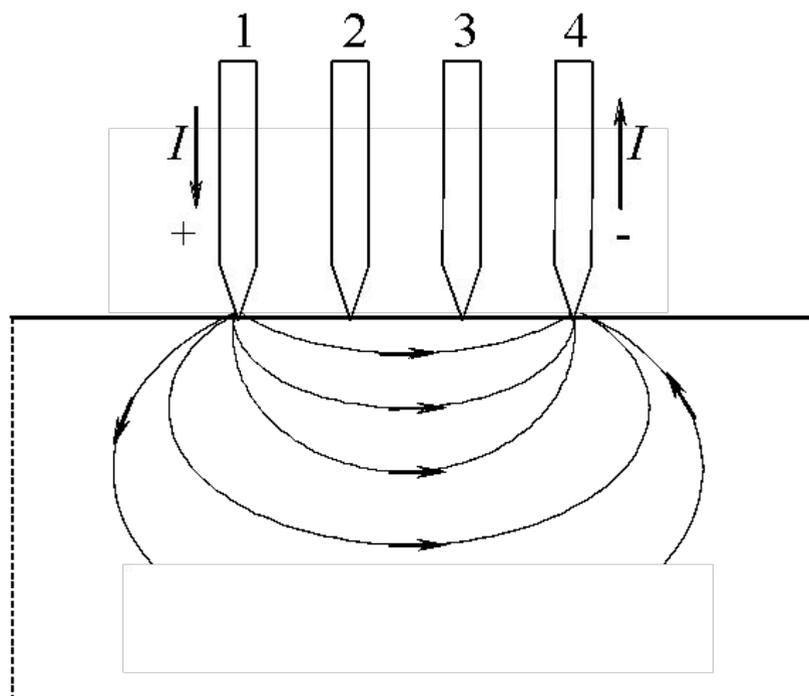


Рис.1.5. Растекание тока при измерении ρ

Потенциал в точке 2 найдем как сумму потенциалов, создаваемых током I , вытекающим из точки 1, и током, втекающим в точку 4 (рис.1.5). Потенциал имеет положительный знак для тока, втекающего в образец, и отрицательный - для тока, вытекающего из образца. Поэтому потенциалы в точках 2 и 3 будут соответственно равны

$$V_2 = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{s} - \frac{1}{2s} \right) = +\frac{I\rho}{4\pi s} \quad \text{и} \quad V_3 = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{2s} - \frac{1}{s} \right) = -\frac{I\rho}{4\pi s},$$

где s - расстояние между зондами.

$$V = V_{23} = V_2 - V_3 = \frac{I\rho}{2\pi s}$$

откуда удельное сопротивление

$$\rho = 2\pi s \frac{V_{23}}{I}.$$

Полубесконечный образец

Отношение $R_A = \frac{V_{23}}{I}$ называется сопротивлением растекания. По заданной величине тока I , измеренному значению напряжения V_{23} и известному межзондovому расстоянию s определяются удельное сопротивление ρ полубесконечного образца. Толщина образца d и расстояние l от краев образца должны быть много больше расстояния между зондами s . Полученное выражение для удельного сопротивления справедливо при расположении зондов по линии, причем ток пропускают через два крайние зонды 1 и 4.

Расстояние между зондами s составляет от десятых долей до единиц миллиметров. Если линейные размеры образца сравнимы с расстоянием s , то вычисленные значения ρ будут завышенными, когда образец граничит с изолирующей средой, и заниженными при контакте образца с проводящим материалом. В первом случае растекание тока происходит в меньшем объеме, поэтому реальная плотность тока выше расчетной плотности тока. Во втором случае, падение напряжения вдоль линий тока в более проводящей области уменьшается.

Для образцов малых размеров следует вводить поправочные коэффициенты. Расчеты показывают, что поправками можно пренебречь при выполнении условий

$$\frac{d}{s} \geq 3, \quad \frac{l}{s} \geq 3.$$

Тонкий образец

Реализуется при измерении поверхностного сопротивления тонких полупроводниковых пластин и проводящих (полупроводниковых и металлических) слоев, изолированных от проводящих подложек.

В тонком образце распределение тока и потенциала по толщине слоя можно считать однородным и характеризующимся цилиндрической симметрией. Радиальная часть потенциала находится из решения уравнения Лапласа.

$$\Delta V = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dV}{dr} \right) = 0.$$

$$V(r) = C_1 \ln r + C_2$$

$C_2=0$, так как интерес представляет лишь разность потенциалов в точках 2 и 3. C_1 находим из того, что сила тока, протекающего через цилиндрическую поверхность, равна

$$I = jS = \frac{E}{\rho} 2\pi r d$$

откуда

$$E = \frac{I\rho}{2\pi r d} = \frac{I}{2\pi r} R_s$$

где $R_s = \frac{\rho}{d}$ - поверхностное сопротивление.

Тонкий образец

$$C_1 = -\frac{IR_s}{2\pi},$$

и тогда

$$V(r) = -\frac{IR_s}{2\pi} \ln r.$$

$$V_{23} = V_2 - V_3 = -\frac{IR_s \ln s}{2\pi} + \frac{IR_s \ln 2s}{2\pi} + \frac{IR_s}{2\pi} \ln 2s - \frac{IR_s}{2\pi} \ln s = -\frac{IR_s}{2\pi} \ln \frac{1}{4} = \frac{IR_s \ln 2}{\pi},$$

откуда

$$R_s = k \frac{V_{23}}{I} = kR_A = \frac{\pi}{\ln 2} R_A.$$

Коэффициент растекания k для бесконечной пластины составляет $k = \frac{\pi}{\ln 2} = 4.5324$ - зонды в линию и $k = \frac{2\pi}{\ln 2} = 9.0648$ - зонды по вершинам квадрата. Эти значения справедливы, если расстояние от зондовой головки до края образца l больше межзондового расстояния s в десять и более раз.

Удельное сопротивление металлических, однородно легированных полупроводниковых слоев или тонких пластин, толщина d которых по крайней мере в 3 раза меньше расстояния s , рассчитывается по следующей формуле.

$$\rho = k \frac{V_{23}}{I} d = kR_A d = 4.5324 R_A d = R_s d.$$

Тонкий образец

Если d сравнимо с s , то следует ввести поправочный коэффициент f , зависящий от отношения толщины пластины к межзондovому расстоянию $f = f\left(\frac{d}{s}\right)$.

$$\rho = fk \frac{V_{23}}{I} d$$

Значения поправочного коэффициента f в зависимости от отношения толщины пластины d к межзондovому расстоянию s

$\frac{d}{s}$	0.4000	0.5000	0.6250	0.7143	0.8333	1.0000	1.2500
$f\left(\frac{d}{s}\right)$	0.9995	0.9974	0.9898	0.9798	0.9600	0.9214	0.8490

На рис.1.6 представлена зависимость поправочного коэффициента f от отношения толщины полупроводниковой пластины (слоя) d к расстоянию между соседними зондами s

Тонкий образец

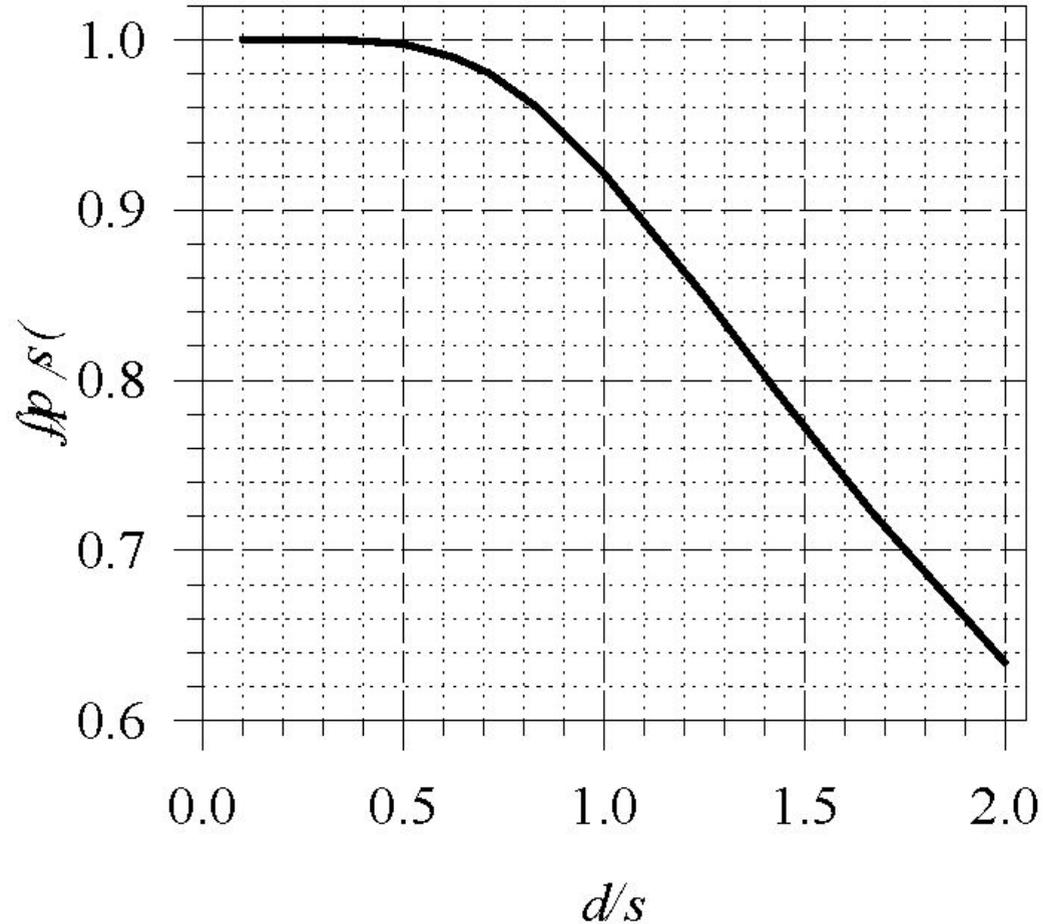


Рис.1.6. Зависимость поправочного коэффициента f от отношения толщины пластины (слоя) d к расстоянию между соседними зондами s

Даже при $\frac{d}{s} = 0.5$ слой считается тонким, так как отличие f от 1 составляет менее 0.5 %.

Двухслойные структуры

Примерами двухслойных структур являются диффузионные, ионно-имплантированные, эпитаксиальные слои на полупроводниковой пластине, отличающиеся от подложки удельным сопротивлением и (или) типом проводимости.

Если $s \gg d_1, d_2$ и зонды расположены далеко от краев пластины, то можно считать, что сопротивления слоев R_{s1} и R_{s2} включены параллельно по отношению к зондам 1 и 4, и

$$\frac{1}{R_s} = \frac{1}{R_{s1}} + \frac{1}{R_{s2}} = \frac{d_1}{\rho_1} + \frac{d_2}{\rho_2} = \sigma_1 d_1 + \sigma_2 d_2,$$

где σ_1 и σ_2 - удельные проводимости слоев (рис.1.6).

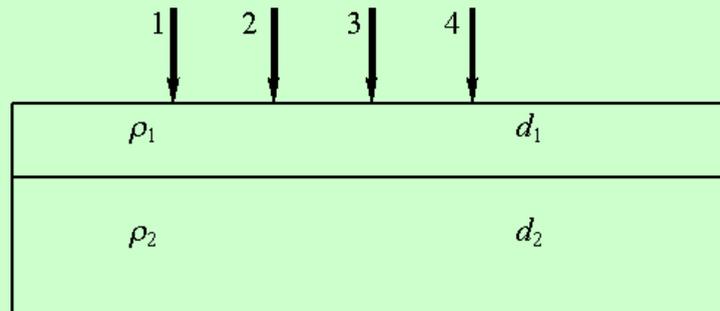


Рис.1.7. Двухслойная структура: d_1 и d_2 - толщины слоев; ρ_1 и ρ_2 - удельные сопротивления

Удельное сопротивление первого (верхнего) слоя можно достоверно определить лишь в случае, когда влиянием второго слоя можно пренебречь, то есть если $\sigma_1 d_1 \gg \sigma_2 d_2$. Тогда

$$\rho_1 = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{V}{I} d_1 = 4.532 \frac{V}{I} d_1.$$

Двухслойные структуры

Пример. Слои и подложка имеют одинаковый тип проводимости (изотипны). $d_2=300$ мкм, $\rho_2=10$ Ом·см. Вышеприведенная формула применима для расчета ρ_1 верхнего слоя при $d_1=1$ мкм и $\rho_1 < 3 \cdot 10^{-3}$ Ом·см. При $d_1=10$ мкм ρ_1 должно быть меньше $3 \cdot 10^{-2}$ Ом·см.

Таким образом, четырехзондовый метод можно использовать для определения удельного сопротивления сильнолегированных слоев на высокоомных подложках, то есть в структурах типа n^+-n или p^+-p .

Четырехзондовый метод также можно применять для определения тонких слоев, отличающихся от подложки типом проводимости (структуры типа $n-p$ или $p-n$), так как на границе $p-n$ перехода образуется высокоомная область пространственного заряда (ОПЗ) и растекание тока происходит лишь в верхнем слое. Однако в этом случае измерения следует проводить при достаточно малых напряжениях (не более 50 - 100 мВ), чтобы обратный ток $p-n$ перехода, изолирующего верхний слой от подложки, был мал и подложка не оказывала бы шунтирующего влияния. Кроме того, необходимо учитывать, что при обратном смещении $p-n$ перехода уменьшается эффективная толщина верхнего исследуемого слоя из-за расширения ОПЗ, что может привести к завышенным на 10 - 20% измеряемым значениям удельного сопротивления. Измерения следует проводить при малых напряжениях на зондах, малых токах утечки через $p-n$ переход и не допускать прокола зондами тонкого полупроводникового слоя.

Четырехзондовым методом определяют удельное сопротивление в структурах кремний на сапфире (КНС) и кремний на диэлектрике (КНД). Удельное сопротивление подложек в таких структурах составляет $\rho_2 \geq 10^{13}$ Ом·см.

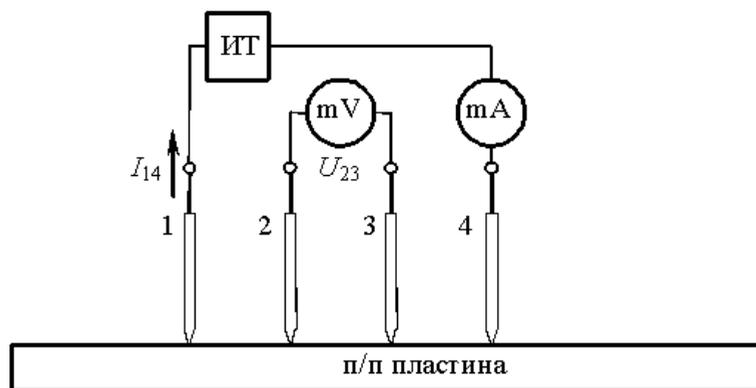
Двухслойные структуры

Для часто используемых в силовой электронике полупроводниковых структур типа n-n⁺ (p-p⁺) четырехзондовый метод неприменим, поскольку измеренные значения ρ будут определяться не столько свойствами верхнего слоя, сколько свойствами сильнопроводящей (сильнолегированной) подложки.

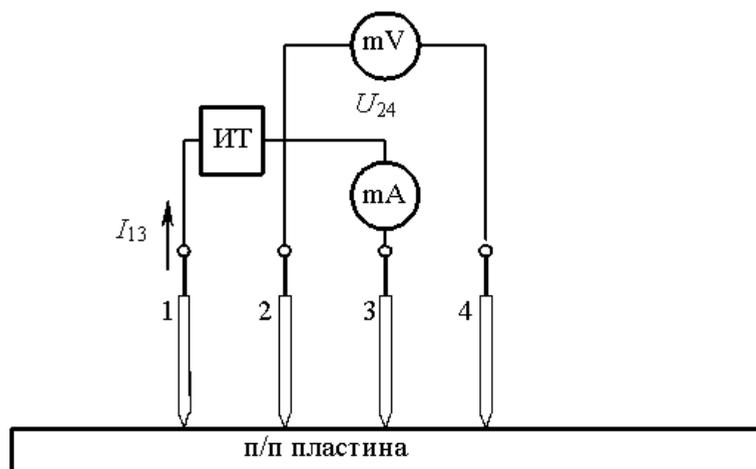
На измеряемое значение ρ существенное влияние оказывает состояние поверхности полупроводника. Поверхностная проводимость может сильно отличаться от объемной. Поверхностный потенциал изменяется со временем и зависит от газовой среды, что связано с образованием на поверхности кремния естественного окисла и значительным влиянием поверхностных состояний. Измерения поверхностного (удельного) сопротивления как слоев кремния, так и подложек следует проводить после специальной химической обработки поверхности пластин.

Например, поверхностное сопротивление слоев кремния n-типа проводимости производят после освежения поверхности в буферном травителе на основе фтористоводородной кислоты, промывки в деионизованной воде и сушки. А поверхностное сопротивление слоев кремния p-типа проводимости производят после обработки в горячей смеси КАРО (серно-перекисный раствор) промывки в деионизованной воде и сушки.

Метод самокомпенсации геометрических эффектов



а)



б)

Рис.1.8. Метод самокомпенсации геометрических эффектов. Измерение R_a (а) и R_b (б).

Для пластин конечных размеров надо учитывать, что чем меньше размер образца, тем выше погрешность измерений. Например, для пластины диаметром 50 мм погрешность менее 2% сохраняется только на 50% площади в центре и возрастает при измерении у края пластины.

При оценке однородности поверхностного сопротивления по площади полупроводникового слоя (пластины) измерения проводят по всей пластине, в том числе и у края пластины. В этом случае необходимо вычисление поправки коэффициента k в каждой области, где производится измерение.

Зондовую головку располагают так, чтобы линия зондов совпадала с радиусом пластины. После контактирования зондов с поверхностью пластины проводят два измерения (рис.1.8).

Сначала измеряют R_a , пропуская ток через зонды 1 и 4 и измеряя падение напряжения между зондами 2 и 3. Затем измеряют R_b , задавая ток через зонды 1 и 3 и измеряя падение напряжения между зондами 2 и 4.

Метод самокомпенсации геометрических эффектов

По результатам определения сопротивлений $R_a = \frac{U_{23}}{I_{14}}$ и $R_b = \frac{U_{24}}{I_{13}}$ рассчитывают коэффициент $k = k_\alpha$, используя следующие зависимости.

$$k_\alpha = \frac{\pi}{\ln 2} \cdot \left(1 + \frac{1}{\xi}\right) \cdot f(\xi)$$

где $\xi = \frac{\frac{R_a}{R_b}}{\frac{R_a}{R_b} - 1}$, а $f(\xi)$ находится из решения следующего трансцендентного уравнения.

$$\frac{\xi - 1}{\xi + 1} \cdot \frac{\ln 2}{f(\xi)} = \cosh^{-1} \left(\frac{1}{2} \exp \left\{ \frac{\ln 2}{f(\xi)} \right\} \right)$$

С точностью 0.05% можно определить зависимость k_α от отношения $\frac{R_1}{R_2}$ в виде полинома второго порядка от аргумента $\frac{R_a}{R_b}$.

$$k_\alpha = -14.696 + 25.173 \frac{R_a}{R_b} - 7.872 \left(\frac{R_a}{R_b} \right)^2$$

При этом $\frac{R_a}{R_b} = 1.20 - 1.30$.

Современные установки измерения поверхностного сопротивления

Современные автоматизированные установки измерения поверхностного сопротивления используют обычно шаговое перемещение по радиусу ρ и азимутальному углу φ . В них используется метод самокомпенсации. Это позволяет определять поверхностное сопротивление проводящего слоя с погрешностью не более 0,1%, если зонды отстоят от края пластины на расстоянии не менее пяти промежутков между зондами s .

Они представляют собой автоматизированные системы сбора, записи, анализа и представления данных по поверхностному удельному сопротивлению. Измерения производятся в большом количестве областей на пластине, что используется для регистрации неоднородностей поверхностного сопротивления монокристаллических диффузионных, эпитаксиальных и ионнолегированных слоев, поликристаллических слоев и слоев металлов.

Такие установки обеспечивают различные варианты измерения поверхностного сопротивления, например, такие как:

- контурные диаграммы (поверхностное сопротивление измеряется в 49, 81, 255, 361, 441 или 625 областях на пластине);

- диаграммы распределения по диаметру (поверхностное сопротивление измеряется в 49, 81, 255, 361, 441 или 625 областях по диаметру пластины);

- скоростные испытания (измерения поверхностного сопротивления в 1, 3, 5, 6, 9 или 10 областях на пластине) по стандартным тестам ASTM или Semi.

Современные установки измерения поверхностного сопротивления

Контурные диаграммы

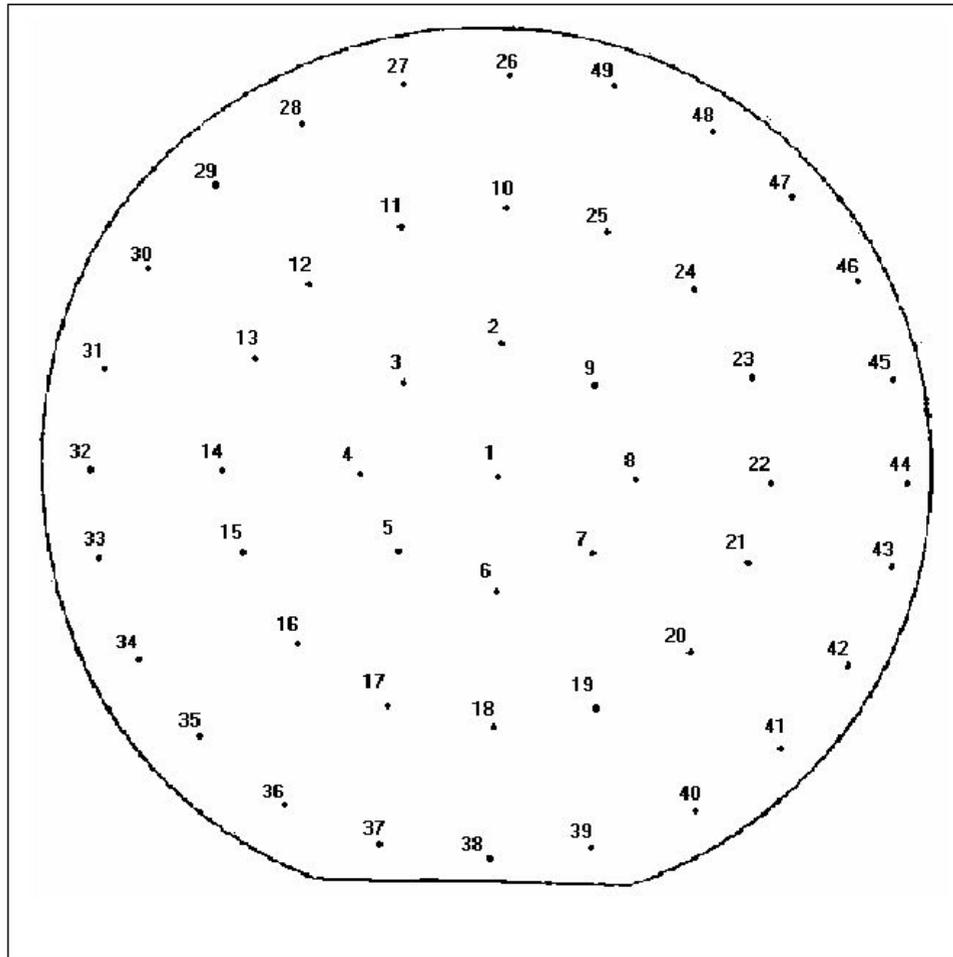


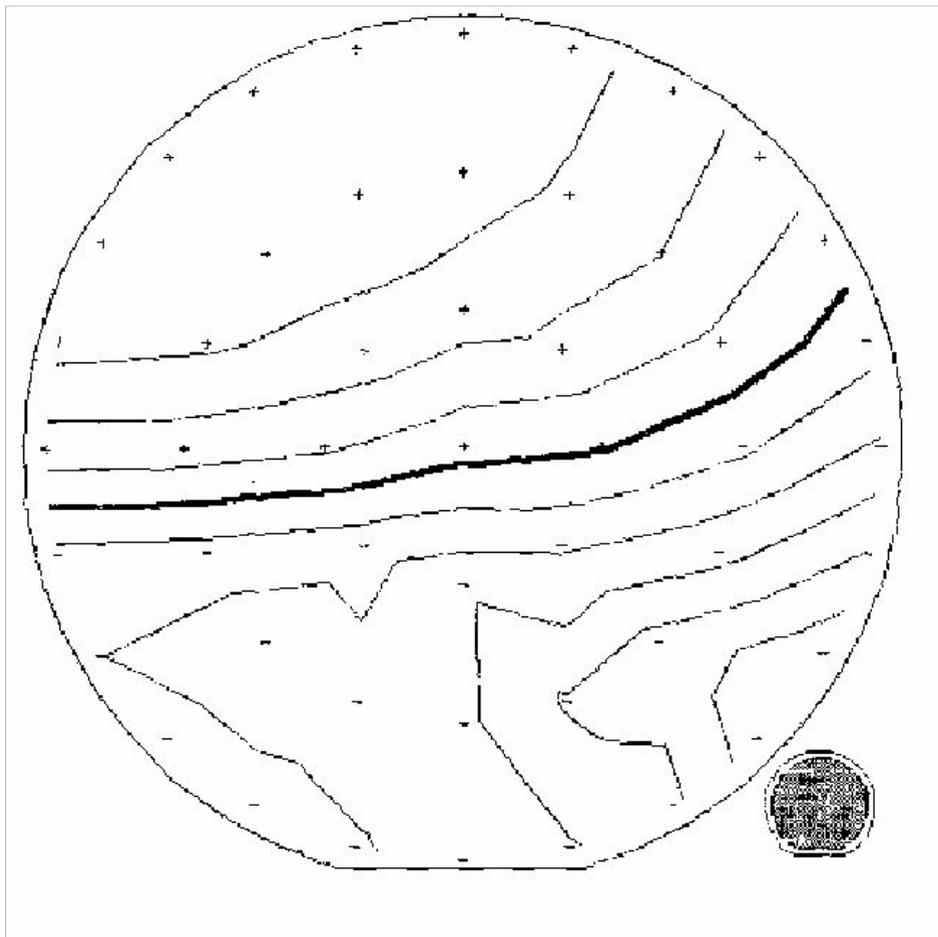
Рис1-9. Обход пластины по 49-ти областям

Сбор данных контурной диаграммы производится следующим образом. Одна область измерения находится в центре пластины, а остальные расположены на concentрических окружностях на одинаковых друг от друга расстояниях (рис.1.9). Расстояния между окружностями определяется диаметром тестирования, при этом диаметр внешней окружности равен диаметру тестирования.

Количество используемых окружностей зависит от выбранного набора точек измерения. Количество окружностей для 49 точек измерения равно 3, для 81 \square 4, для 225 \square 7 и т.д.

Современные установки измерения поверхностного сопротивления

Контурные диаграммы



Два параметра влияют на построение контурной диаграммы.

1. Контурный интервал, определяющий интервал между изолиниями и выражающийся в процентах от среднего значения.

2. Критерий сортировки, используемый для исключения из контурной диаграммы всех значений, попадающих в интервал – среднее значение $\pm N \cdot \text{Sigma}$, где критерий сортировки равен $N \cdot \text{Sigma}$.

Жирная темная линия на контурной диаграмме (рис.1.10) показывает среднее значение R_s на пластине. Знак «+» показывает область, измеренное значение R_s в которой превышает среднее значение, каждый знак «-» показывает точку, измеренное значение R_s в которой меньше среднего значения R_s .

Рис1-10. Типичный вид контурной диаграммы

Современные установки измерения поверхностного сопротивления

Автоматизированные системы измерения поверхностного сопротивления позволяют представлять результаты измерения и в виде квазитрехмерных диаграмм. Типичный вид квазитрехмерной диаграммы представлен на рисунке 1-11.

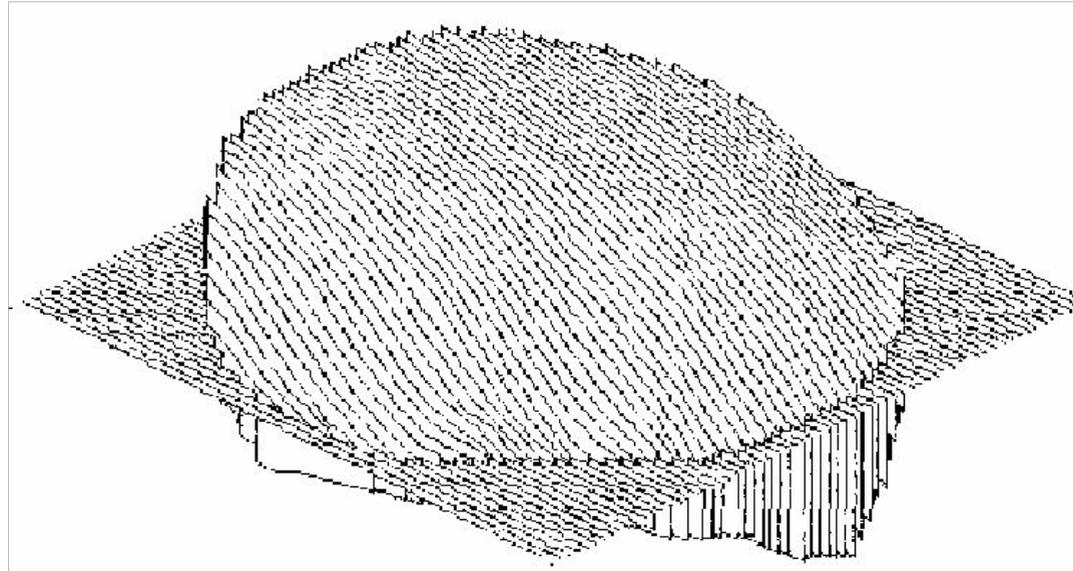


Рис1-11. Типичный вид квазитрехмерной диаграммы

Плоскость, окружающая по периметру диаграмму, показывает среднее значение поверхностного сопротивления полупроводникового слоя. Области выше и ниже этой плоскости показывают значения поверхностного сопротивления, которые, соответственно, больше и меньше среднего значения поверхностного сопротивления.

Современные установки измерения поверхностного сопротивления

Диаграммы распределения по диаметру

В этом режиме данные измеряются при проходе по диаметру пластины в указанном пользователем направлении. По диаметру на одинаковых расстояниях друг от друга располагается 49, 81, 255, 361, 441 или 625 точек измерения; диаметр на котором выполняются измерения, указывается пользователем. Эти точки расположены на одинаковых расстояниях друг от друга и находятся на одном отрезке диаметра, при этом по обе стороны от центра пластины находится одинаковое количество точек. Расстояния между отдельными точками измерения определяется диаметром тестирования, который указывается пользователем для каждого испытания. Одним из параметров данной диаграммы является угол прохода, который определяет направление прохода по диаметру. Этот угол указывает направление прохода на пластине по отношению к верхней части пластины.

Скоростные и «ручные» испытания

Автоматизированные установки измерения поверхностного сопротивления могут использоваться для так называемых скоростных испытаний - быстрых измерений поверхностного сопротивления, включающих в себя 1, 3, 4, 5, 6, 8, 9 или 10 точек измерения. Имеются различные конфигурации быстрых измерений, например, по стандартам ASTM и SEMI. Также можно проводить измерения поверхностного сопротивления при задании координат измеряемой области вручную с клавиатуры.

Современные установки измерения поверхностного сопротивления

Автоматизированная система измерения поверхностного сопротивления фирмы Prometrix OmniMap RS-55 Resistivity Mapping System



Рис.1-11. Автоматизированная система измерения поверхностного сопротивления OmniMap RS-55

Система позволяет измерять R_s в большом количестве областей (до 625) на пластинах диаметром от 50 мм до 200 мм в темновых условиях. Возможно также измерение распределения по диаметру пластины и по стандартным тестам.

Пластины размещаются на изолированном столе диаметром 200 мм.

Диапазон измеряемых сопротивлений – от 10 мОм до 5 Мом. Воспроизводимость результатов – не хуже 1 %.

Современные установки измерения поверхностного сопротивления



Рис.1-12а. Автоматизированная система измерения поверхностного сопротивления тонких слоев QuadPro 300 фирмы Signatone

Автоматизированная система измерения сопротивления тонких слоев QuadPro 300 mm Thin Film Resistivity Measurement System фирмы Signatone

Система позволяет измерять R_s в большом количестве областей (до 121) на пластинах диаметром от 100 мм до 200 мм в темновых условиях. Возможны также измерения малых образцов с характерным размером не менее 10 мм.

Пластины размещаются на изолированном столе диаметром 300 мм. Температура стола может варьироваться в диапазоне от комнатной до 120 °С для определения температурного коэффициента поверхностного сопротивления. Диапазон измеряемых сопротивлений – от 10 мОм до 10 Мом. Воспроизводимость результатов – не хуже 0.5 %.

Результаты представляются в виде карт распределения по пластине 2D и 3D, а также в численном виде.

Рассчитываются также среднее значение поверхностного сопротивления и среднее квадратичное отклонение от среднего.

Современные установки измерения поверхностного сопротивления

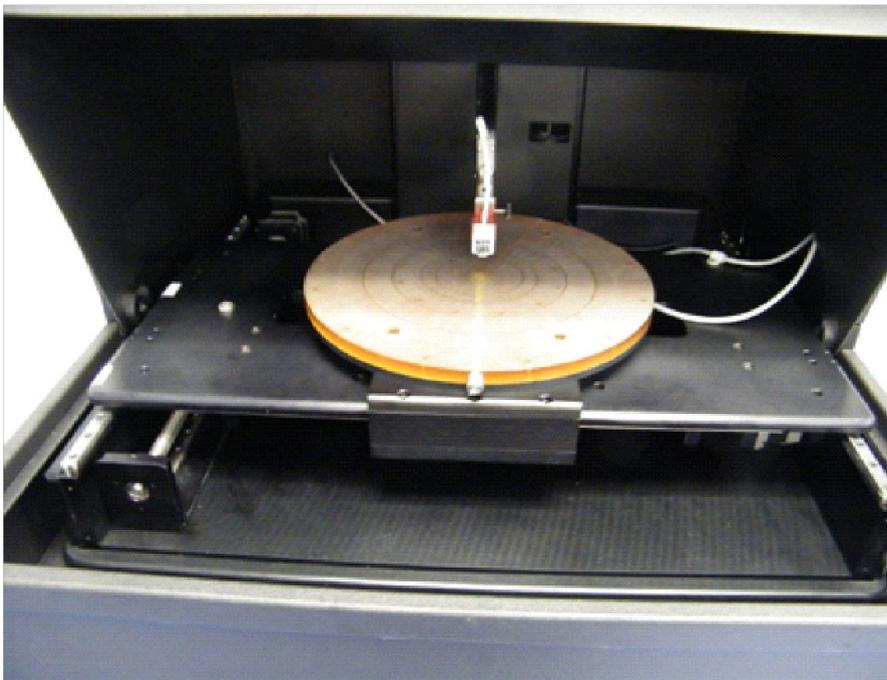


Рис.1-126. Измерительная камера системы QuadPro 300



Рис.1-12в. Четырехзондовая головка системы QuadPro 300

Современные установки измерения поверхностного сопротивления

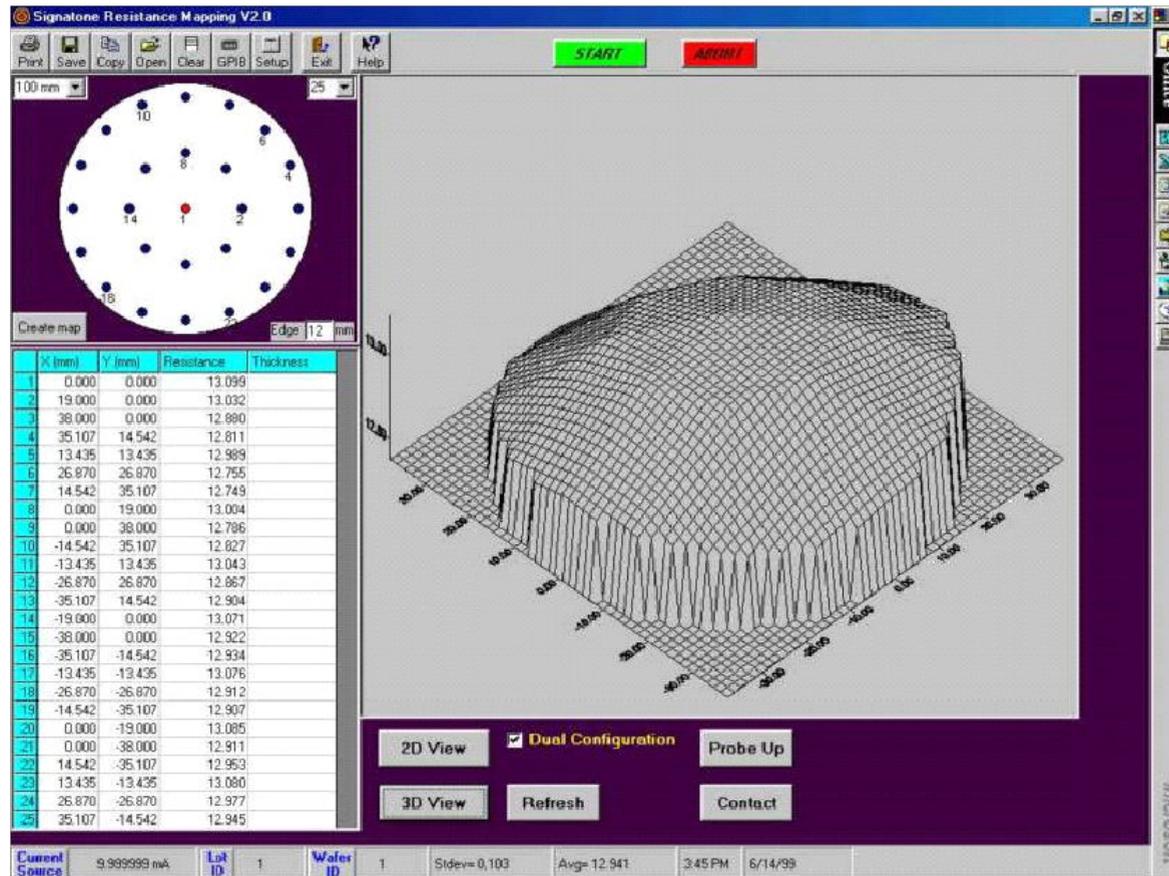


Рис.1-12г. Изображение экрана видеомонитора системы QuadPro 300 с результатами измерения в виде квазитрехмерной карта поверхностного сопротивления

Определение профиля удельного сопротивления полупроводникового слоя

В неоднородно легированных полупроводниковых слоях можно определять распределение удельной электропроводности $\sigma(x)$ (удельного сопротивления $\rho(x)$) по толщине полупроводникового (кремниевое) слоя четырехзондовым методом. Определение профиля удельной электропроводности производят в несколько этапов.

- 1) Измеряют поверхностное сопротивление полупроводникового слоя R_{S0} .
- 2) Производят первое анодное окисление поверхности кремния.
- 3) Измеряют толщину образовавшегося слоя SiO_2 d_{ox1} , например, цветовым методом или методом эллипсометрии.
- 4) Удаляют слой SiO_2 во фтористоводородной кислоте (HF).
- 5) Рассчитывают толщину удаленного слоя кремния $\delta_1 = a \cdot d_{\text{ox1}}$, где $a \approx 0.46$.
- 6) Измеряют поверхностное сопротивление полупроводникового слоя R_{S1} .
- 7) Рассчитывают среднюю удельную электропроводность первого удаленного слоя кремния по формуле:

$$\sigma_1 = \left(\frac{1}{R_{S0}} - \frac{1}{R_{S1}} \right) \frac{1}{\delta_1}$$

Эту процедуру повторяют столько раз, сколько необходимо для определения профиля удельной электропроводности в слое заданной толщины.

Процесс анодного окисления можно отработать таким образом, чтобы на каждом этапе удалять слой кремния одинаковой толщины, то есть $d_{\text{ox1}} = d_{\text{ox2}} = \dots = d_{\text{oxn}} = d_{\text{ox}}$ и, соответственно $\delta_1 = \delta_2 = \dots = \delta_n = \delta$. В этом случае определение средней удельной электропроводности i -того удаленного слоя кремния можно рассчитать по следующей формуле.

$$\sigma_i = \left(\frac{1}{R_{S(i-1)}} - \frac{1}{R_{Si}} \right) \frac{1}{\delta}$$

Среднее удельное сопротивление i -того удаленного слоя кремния равно $\rho_i = \sigma_i^{-1}$.

Определение профиля удельного сопротивления полупроводникового слоя

Полученные результаты измерений и расчетов заносятся в следующую таблицу.

Таблица для расчета профилей

δ_i , МКМ	x , МКМ	R_{S_i} , Ом	σ_i , Ом ⁻¹ ·см ⁻¹	ρ_i , Ом·см	N_{D_i} , см ⁻³
0	0	R_{S0}	-	-	-
δ_1	$\frac{\delta_1}{2}$	R_{S1}	$\sigma_1 = \left(\frac{1}{R_{S0}} - \frac{1}{R_{S1}} \right) \frac{1}{\delta_1}$	$\rho_1 = \frac{1}{\sigma_1}$	N_{D1}
δ_2	$\delta_1 + \frac{\delta_2}{2}$	R_{S2}	$\sigma_2 = \left(\frac{1}{R_{S1}} - \frac{1}{R_{S2}} \right) \frac{1}{\delta_2}$	$\rho_2 = \frac{1}{\sigma_2}$	N_{D2}
...
δ_j	$\sum_{i=1}^j \delta_i + \frac{\delta_j}{2}$	R_{Sj}	$\sigma_j = \left(\frac{1}{R_{S(j-1)}} - \frac{1}{R_{Sj}} \right) \frac{1}{\delta_j}$	$\rho_j = \frac{1}{\sigma_j}$	N_{Dj}
...
δ_n	$\sum_{i=1}^n \delta_i + \frac{\delta_n}{2}$	R_{Sn}	$\sigma_n = \left(\frac{1}{R_{S(n-1)}} - \frac{1}{R_{Sn}} \right) \frac{1}{\delta_n}$	$\rho_n = \frac{1}{\sigma_n}$	N_{Dn}

Концентрация легирующей примеси N_D рассчитывается с использованием данных графика зависимости $\rho_n = \rho_n(N_D)$ (рис.2б) в предположении, что подвижность электронов зависит от концентрации доноров так, как это показано на рис.2а. После проведения расчетов могут быть построены графики распределения удельной электропроводности $\sigma = \sigma(x)$, удельного сопротивления $\rho = \rho(x)$ или концентрации доноров $N_D = N_D(x)$ по толщине слоя кремния.