

*Методы измерения
удельного сопротивления
полупроводников*

Содержание

1. Полупроводники
2. Методы измерения удельного сопротивления полупроводников
3. Четырехзондовый метод измерения
4. Погрешности четырехзондового метода
5. Двухзондовый метод измерения удельного сопротивления
6. Измерение удельного сопротивления методом Ван дер Пау

Полупроводники

Полупроводник – материал, который по своей удельной проводимости занимает промежуточное место между проводниками и диэлектриками и отличается от проводников сильной зависимостью удельной проводимости от концентрации примесей, температуры и воздействия различных видов излучения. Основным свойством полупроводника является увеличение электрической проводимости с ростом температуры.

Методы измерения удельного сопротивления полупроводников

- ✓ Четырехзондовый метод
- ✓ Двухзондовый метод
- ✓ Метод Ван дер Пау

Четырехзондовый метод

Наиболее распространенным в контроле качества полупроводниковых материалов является четырехзондовый метод измерения удельного сопротивления. Применение этого метода обусловлено его высокими метрологическими показателями, простотой конструкции измерительных средств, возможностью проведения измерений удельного сопротивления как объемных монокристаллов, так и полупроводниковых слоев в различного типа слоистых структурах, например с диффузионными, ионно-имплантированными и эпитаксиальными слоями.

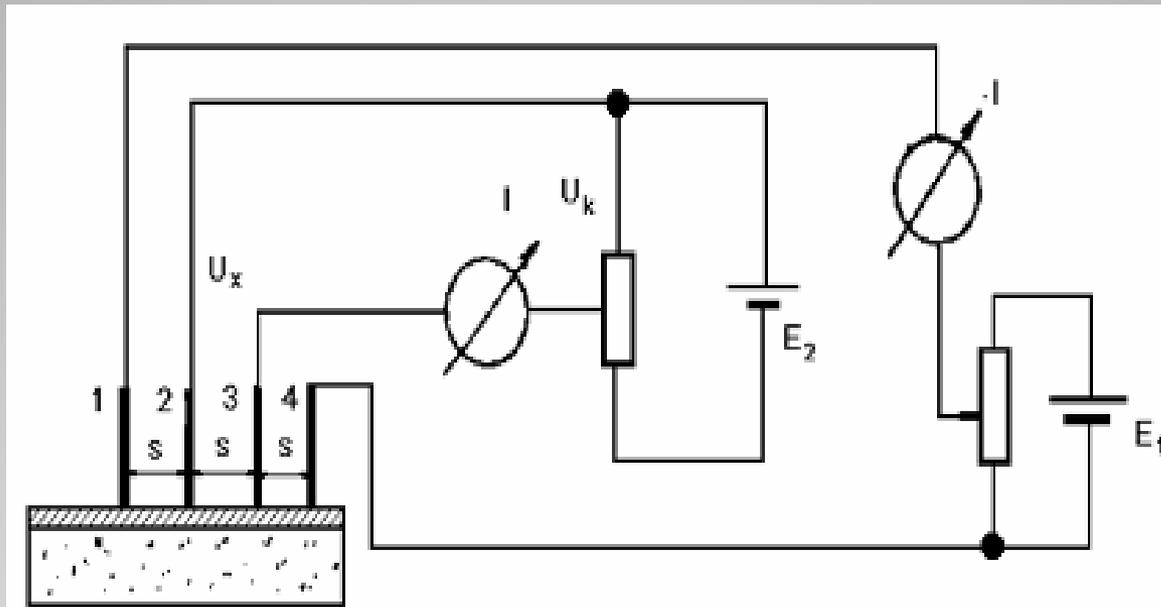
Четырехзондовый метод основан на явлении растекания тока в точке контакта металлического острия с полупроводником.

Четырехзондовый метод



- изменение удельного сопротивления четырехзондовым методом при расположении зондов в линию

Четырехзондовый метод



- измерение удельного сопротивления четырехзондовым методом при расположении зондов по вершинам квадрата

Погрешности четырехзондового метода

- ✓ размер контактной площадки
- ✓ расстояние между зондами
 - ✓ ток
- ✓ контактные сопротивления
 - ✓ температура
 - ✓ нагрузка на зонд

Погрешности четырехзондового метода

Размер контактной площадки

Если контактная площадка образуется под одним из потенциальных зондов, погрешность:

$$\delta = -(1/2 \ln 2) \ln \left[\frac{2 + r^2 / s^2}{2 - r^2 / s^2} \right]$$

Если условие точности нарушается для одного из токовых зондов, то:

$$\delta = (1/2 \ln 2) \ln \left[\frac{6 - r^2 / s^2}{6 - 2r^2 / s^2} \right]$$

где s — расстояние между зондами ($s_1 = s_2 = s_3 = s$), r — радиус контактной площадки.

При размещении зондов по вершинам квадрата систематическая погрешность в обоих случаях описывается выражением:

$$\delta = -(1/2 \ln 2) \ln \frac{2(1 + r^4 / s^4)}{1 + (1 - r^2 / s^2)^2} \quad \text{где } s \text{ — сторона квадрата}$$

Погрешности четырехзондового метода

Расстояние между зондами

Невоспроизводимость расстояния между зондами вносит случайную погрешность измерений. Если положение контакта каждого зонда с полупроводником флуктуирует независимо со среднеквадратическим отклонением σ , то случайная погрешность измерения удельного сопротивления при эквидистантном расположении зондов в линию с доверительной вероятностью 0,95 в случае, когда измерения проводятся на объемных монокристаллах с применением формулы:

$$\rho = 2\pi sU / I = F_1^\circ sU / I$$

где U -разность потенциалов, I -ток через токовые зонды, ρ — удельное сопротивление образца, s - расстояние между зондами.

Погрешности четырехзондового метода

Ток

При прохождении тока образец может нагреваться. Температурный коэффициент сопротивления полупроводников достигает $0,9\% \text{ K}^{-1}$, поэтому изменение температуры образца приведет к значительным изменениям удельного сопротивления. Кроме того, вследствие неравномерного выделения тепла на контактных сопротивлениях токовых зондов возможно появление вдоль образца градиента температуры. В этом случае на потенциальных зондах возникнет дополнительная разность потенциалов из-за продольной термо-ЭДС. Чтобы исключить этот источник погрешности, ток через зонды выбирается минимальным, обеспечивающим, однако, заданную точность измерения тока и напряжения. Измерения проводят при двух полярностях тока, и удельное сопротивление определяют как среднее из двух полученных значений.

Погрешности четырехзондового метода

Контактные сопротивления

Контактные сопротивления являются одной из основных причин, ограничивающих применение четырехзондового метода.

Чтобы ограничить влияние переходных сопротивлений и выпрямляющего действия контактов на погрешность измерений, зонды рекомендуется изготавливать из металлов, твердость которых превышает твердость материала измеряемого образца. В месте контакта зонда с полупроводником создается локальное механическое нарушение поверхности, контактное сопротивление уменьшается, и эффект выпрямления в значительной степени ослабевает. При этом размер области механического разрушения материала должен быть достаточно малым, чтобы не нарушать условие точечности контакта

Погрешности четырехзондового метода

Температура

Для исключения систематической погрешности, связанной с температурной зависимостью удельного сопротивления полупроводников, необходимо контролировать температуру в процессе измерения. На практике измеренное значение удельного сопротивления $\rho(T)$ при температуре T в целях обеспечения единства измерений приводят к определенной, условно выбранной температуре T_0 .

Для расчетов используют формулу, где C_T — температурный коэффициент:

$$\rho(T_0) = \rho(T) \left[- C_T (T - T_0) \right]$$

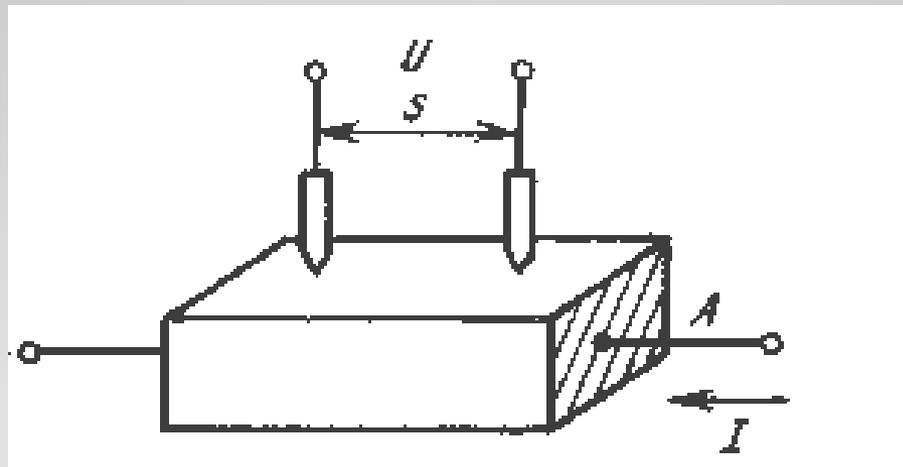
Погрешности четырехзондового метода

Нагрузка на зонд

При измерении удельного сопротивления тонких эпитаксиальных слоев возникает опасность прокалывания слоя металлическим зондом и сильного проявления шунтирующего действия подложки. Чтобы избежать этого, нагрузку на зонд необходимо выбирать достаточно малой. Рекомендуется нагрузку на зонд устанавливать в пределах 0,3 – 0,03 Н. Уменьшение давления на зонды может, однако, привести к возрастанию контактных сопротивлений, что, в свою очередь, требует увеличения входного сопротивления измерителя напряжения.

Двухзондовый метод измерения удельного сопротивления

Двухзондовый метод применяется для измерения удельного сопротивления образцов правильной геометрической формы с известным поперечным сечением.



- измерение удельного сопротивления двухзондовым методом

Двухзондовый метод измерения удельного сопротивления

Отклонение от одномерной модели

Наличие градиентов удельного сопротивления в направлениях, перпендикулярных продольной оси образца, или резкие изменения сечения приводят к искажению эквипотенциальных поверхностей и появлению систематической погрешности, зависящей в общем случае от места расположения потенциальных зондов. Даже при измерении однородного по сечению образца искажение эквипотенциальных линий может происходить вблизи торцевых граней, так как на практике не всегда удается получить однородный по площади омический контакт, и вследствие этого будет происходить трехмерное растекание тока.

Двухзондовый метод измерения удельного сопротивления Межзондовое расстояние

Если положение каждого из зондов фиксируется со среднеквадратическим отклонением Δs , то случайная составляющая погрешности из-за невоспроизводимости межзондового расстояния с доверительной вероятностью 0,95 выражается соотношением

$$\delta\rho / \rho = 1,41(2\Delta s / s)$$

Двухзондовый метод измерения удельного сопротивления

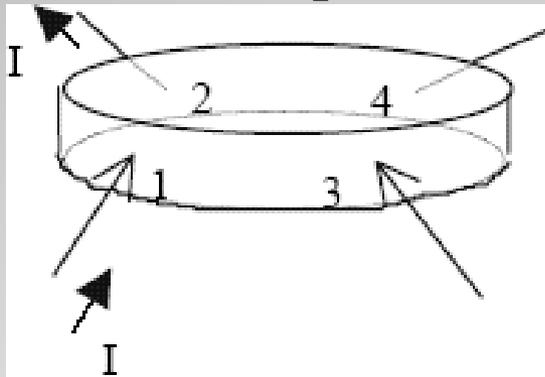
Токовые контакты

Чтобы максимально ограничить эффект растекания тока, торцевые грани образца равномерно по всей площади шлифуются абразивным порошком и затем электролитически металлизируются медью или никелем. В ряде случаев для оперативного проведения измерений образец после шлифовки торцевых граней грубым абразивом зажимается контактными подушками, обеспечивающими однородный контакт по всей поверхности торцевой грани. В качестве контактных подушек можно использовать медную сетку на эластичной упругой основе.

Абразивная обработка токовых граней позволяет также подавить инжекцию носителей в объем кристалла, снизить контактные сопротивления и тем самым исключить влияние тепловых эффектов, связанных с неоднородным нагревом образца

Изменение удельного сопротивления методом Ван дер Пау

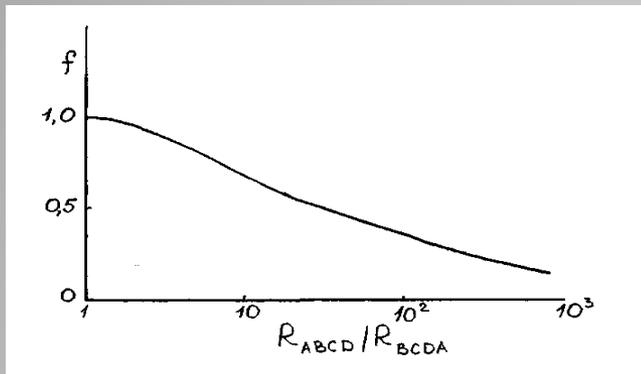
Сущность метода заключается в следующем. На периферии плоского образца создаются четыре контакта: 1, 2, 3 и 4.



- расположение
контактов при
измерении методом
Ван дер Пау

Измеряют два сопротивления: $R_{1234} = U_{34} / I_{12}$ и $R_{2341} = U_{41} / I_{23}$. Теоретический анализ приводит к следующему соотношению: $\rho / d = R_s = (\pi / \ln 2) \left[(R_{1234} + R_{2341}) / 2 \right] f(R_{1234} / R_{2341})$ где d — толщина образца (толщина образца много меньше расстояния между контактами); f — функция поправок, зависящая только от отношения R_{1234} / R_{2341} и удовлетворяющая уравнению

Изменение удельного сопротивления методом Ван дер Пау



Функция поправок при измерении
методом Ван дер Пау

Для определения удельного сопротивления измеряют толщину плоского образца с помощью индикатора с погрешностью измерений не более 1%. Погрешность измерений тока и напряжения при использовании приборов с цифровым отсчетом не более 0,1%. Таким образом, метод Ван дер Пау является одним из наиболее точных методов контроля удельного сопротивления образцов. Он используется для контроля удельного сопротивления плоских кристаллов небольших размеров, например кристаллов карбида кремния. Метод применяется также для отбора и сортировки кристаллов (чипов) кремния, применяющихся для изготовления стабилитронов.

*Спасибо за
внимание!*