

Лекция 7. Измерение сопротивления полупроводников

Подготовка образцов

Для выполнения измерений полупроводниковые образцы должны иметь определенную форму и определенное количество омических контактов. При этом поверхность образца необходимо подготовить так, чтобы она минимальным образом искажала результаты измерений.

Для получения полупроводниковых образцов определенной формы используют различные способы резки с последующей механической и химической обработкой. Применяется механическая резка стальными дисками или полотнами с наждачной суспензией, сухая резка алмазными дисками или полотнами, ультразвуковая резка, при которой режущее долото совершает ультразвуковые колебания. В качестве абразивов при механической и ультразвуковой резке используются порошки карборунда, карбида кремния, карбид бора, корунд, алмазный порошок и другие вещества с высокой твердостью.

Применяется также электролитическая резка, при которой между полупроводниковым образцом и проволочным электродом, находящимся в электролите, прикладывается напряжение и происходит электролитическое растворение полупроводника. Таким образом, постепенным передвижением проволочного электрода или полупроводника можно производить резку.

В случае электроискровой резки в результате электрического разряда между полупроводником и электродом происходит электрическая эрозия, обусловленная высокими локальными температурами в месте разряда. После резки полупроводник подвергают механической шлифовке, полировке и химическому травлению. Цель механической шлифовки и полировки — довести образец до нужных размеров и формы, а также уменьшить нарушения поверхности после резки.

Шлифовка проводится абразивными материалами высокой твердости. Обычно проводят несколько шлифовок с постепенным уменьшением размера зерна абразива. Механическая полировка завершает механическую обработку образца, при которой используются абразивные порошки с самыми малыми размерами зерен. В результате получают образцы с нарушенным поверхностным слоем, размеры которого по порядку величины соответствуют размерам зерна абразивного порошка, использованного при последней механической обработке.

Для устранения последствий механической обработки используют химическое травление образца, основанное на химическом взаимодействии полупроводника с реактивами и последующим удалением продуктов реакции. Химическое травление может быть жидкостным или газовым — продукты реакции выпадают в виде осадка в растворе либо удаляются в виде летучих газов. Более широкое распространение получило жидкостное травление.

Следующей операцией обработки является промывка, для которой используются органические растворители и спирт (главным образом для обезжиривания поверхности), а также вода — единожды или дважды дистиллированная либо деионизированная. Для выполнения измерений на полупроводниковый образец наносятся омические контакты. Основное требование к омическим контактам заключается в том, что они не должны вносить заметного дополнительного сопротивления в рабочем интервале напряжений и токов.

Последнее означает, что сопротивление омических контактов должно быть достаточно малым, а их вольтамперная характеристика — линейной. Омические контакты не должны инжектировать неосновных носителей зарядов и обладать хорошей теплопроводностью.

Нанесение омических контактов с малым сопротивлением может проводиться разными способами. Самыми простыми омическими контактами являются прижимные из мягких металлов, например олова, золота, и намазанные на поверхность пастой, амальгамой. Более надежными являются контакты, нанесенные испарением в вакууме, припайкой, химическим осаждением, катодным распылением и другими методами. При выборе того или иного метода следует учитывать удельное сопротивление полупроводника, тип проводимости и другие параметры.

Методы измерения удельного сопротивления

Определение удельного сопротивления образца по его полному сопротивлению

Существуют контактные и бесконтактные методы определения удельного сопротивления ρ . В первых на поверхности образца создаются металлические контакты, через два из которых пропускают ток I . Между этими либо какими-нибудь двумя другими контактами измеряют создаваемое током I падение напряжения $U = \rho I$, где F — функция формы и размеров образца и контактов, которую находят из теоретического расчета. При известной F по измеренным I и U вычисляют ρ . Простейшим методом такого типа является определение ρ по полному сопротивлению образца.

Пусть полупроводниковый образец имеет форму бруска, на торцы которого нанесены омические контакты. У границы раздела полупроводника и металла может образовываться запирающий слой, концентрация носителей заряда в котором меньше, чем в объеме полупроводника. Поэтому этот слой обладает повышенным сопротивлением. При омическом контакте отсутствует такой слой или слой повышенного сопротивления какой-нибудь иной природы. Концентрация носителей заряда одинакова во всем образце, вплоть до границы с металлом, либо в случае антизапорного слоя у металла она увеличивается.

Сопротивление антизапорного слоя меньше сопротивления слоя такой же толщины в объеме полупроводника, однако поскольку антизапорный слой имеет толщину много меньшую длины образца то уменьшением сопротивления образца из-за существования в нем антизапорного слоя можно пренебречь.

Таким образом при омическом контакте сопротивление слоя любой толщины вблизи границы металла и полупроводника не больше, чем слоя такой же толщины в объеме полупроводника. Протекание через контакт тока не приводит к изменению концентрации носителей заряда в полупроводнике.

В рассматриваемых условиях связь тока и напряжения между контактами определяется формулой

$$\frac{U}{I} = R = \rho \frac{a}{S}$$

где R — сопротивление образца; a — длина; S — площадь поперечного сечения.

Здесь функция F имеет простейший вид $F = \frac{a}{S}$. Измерив отдельно U и I или сразу R , например мостом сопротивлений, по можно вычислить удельное сопротивление ρ , что не вызывает трудностей в случае образцов средней омности с $\rho = 10^{-2} \dots 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ и низкоомных образцов с $\rho < 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{см}$. При этом сопротивление низкоомных образцов может быть сравнимо с сопротивлением токоподводящих проводов, что необходимо учитывать.

При измерениях на высокоомных образцах, обычно с $\rho \geq 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, рассматриваемый способ определения удельного сопротивления может быть осложнен наличием:

1. Емкостного тока.
2. Поляризационными эффектами.
3. Поверхностными утечками.

Емкостный ток. Пусть измерение тока I и напряжения U производится с помощью простой схемы (рис.1, а). Подключим к образцу источник напряжения ИИ с внутренним сопротивлением r_i , через прибор Γ , измеряющий ток, с сопротивлением R_Γ . Током через прибор V , регистрирующий напряжение U , будем пренебрегать. В момент подключения источника питания, как и в более общем случае действия на образец любого переменного напряжения, протекающий через образец ток суммируется из тока проводимости и тока смещения. Соответственно плотность тока:

$$i = \frac{E}{\rho} + \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t},$$

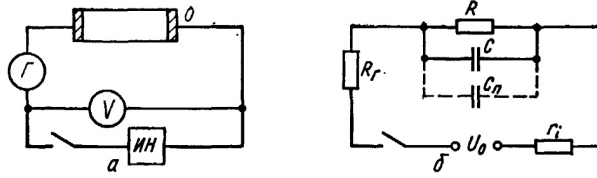


Рис. 1. Схема для измерения сопротивления образца (а) и соответствующая ей эквивалентная схема (б)

где E – напряженность электрического поля в образце; $\varepsilon\varepsilon_0$ – его диэлектрическая проницаемость; t – время.

Поскольку $E = \frac{U}{a}$, из получаем

$$I = \frac{U}{R} + C \frac{dU}{dt},$$

где $C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{a}$ – емкость образца. Соответствующая выражению эквивалентная схема образца приведена на рис. 1, б.

Ток смещения приводит к появлению в эквивалентной схеме емкости C . Параллельно ей подключена еще паразитная емкость монтажа C_{Π} , которая может быть намного большей емкости образца. Пока емкости C и C_{Π} не зарядятся, через прибор Γ наряду с током проводимости будет протекать и ток зарядки емкостей. Зависимость тока через прибор Γ от времени такова:

$$I = \frac{U_0}{R_{\Gamma} + R + r_i} \left(1 + \frac{R}{R_{\Gamma} + r_i} e^{-\frac{t}{R'(C+C_{\Pi})}} \right),$$

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R_{\Gamma} + r_i}.$$

Для $t \gg R'(C + C_{\Pi})$

$$I = \frac{U_0}{R_{\Gamma} + R + r_i} = \frac{U}{R}.$$

Емкостной ток может исказить результаты измерения удельного сопротивления. Для того, чтобы избежать такого искажения, измерения тока нужно проводить в момент времени t , удовлетворяющему неравенству $t \gg R'(C + C_{\Pi})$. Реализация этого способа не вызывает затруднений, если в образце не возникают поляризационные эффекты.

Поляризационные эффекты приводят к изменению тока проводимости через образец при неизменном напряжении между его контактами. Они могут быть обусловлены, например дрейфом в образце ионов, возникновением в нем за счет инжекции электронов и дырок областей пространственного заряда. В зависимости от объекта характерное время изменения тока τ_{Π} может составлять от долей секунды до часов и даже суток.

Влияния поляризационных эффектов на результаты определения удельного сопротивления можно избежать, измерив ток в момент времени t , удовлетворяющий как неравенству $t \gg R'(C + C_{\Pi})$ так и неравенству $t \ll \tau_{\Pi}$

Эти условия могут быть выполнены только при

$$R'(C + C_{\Pi}) \ll \tau_{\Pi}$$

Задачу определения ρ в случае поляризационных эффектов можно решить, измерив полную проводимость (адмитанс) образца на частоте $\omega \ll \frac{1}{\tau_{\Pi}}$. В этом случае за счет инерционности поляризационные эффекты не сказываются на протекании тока, а измерение адмитанса $z^{-1} = \frac{1}{R} + i\omega(C + C_{\Pi})$ где i – мнимая единица, позволяет отдельно найти величины R и $(C + C_{\Pi})$. Для измерения z^{-1} используют мосты переменного тока.

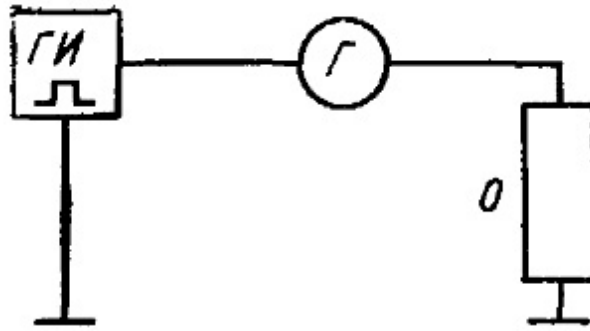


Рис. 2. Импульсная схема для измерения сопротивления

При определении ρ в условиях проявления поляризационных эффектов можно использовать питание от импульсного источника. Одна из возможных схем приведена на рис.2. Здесь генератор прямоугольных импульсов ГИ питает цепь, состоящую из последовательно соединенных гальванометра Г и образца О. Длительность импульсов τ_u и период их следования T удовлетворяют неравенствам $\tau_u \ll \tau_{II} \ll T$, что исключает действие эффектов поляризации. Гальванометр регистрирует средний ток в цепи. Во время действия импульса емкость образца и параллельная ей паразитная емкость монтажа заряжаются через гальванометр, а по окончании импульса через него разряжаются. Поэтому емкостный ток не дает вклада в регистрируемый гальванометром средний ток. Величина его $I = I_u \tau$, где I_u – ток проводимости во время действия импульса напряжения. Определив величину I_u можно вычислить при известной амплитуде импульсов напряжения U_u сопротивление образца $R = \frac{U_u}{I_u}$, а затем его удельное сопротивление. С помощью такой методики при питании образцов импульсами с амплитудой $U_u = (1 \dots 2)$ кВ, $\tau_u = 1$ мкс, $\frac{T}{\tau_u} = 1000$ и чувствительности гальванометра 10^{-10} А/деление удалось измерять удельное сопротивление ρ вплоть до 10^{10} Ом·см, а с помощью промышленных мостов переменного тока обычно до $10^6 \dots 10^7$ Ом·см.

Поверхностная утечка. Удельное сопротивление приповерхностной области полупроводника, как правило, отличается от удельного сопротивления объема. Это связано с существованием у поверхности области пространственного заряда, где концентрации электронов и дырок могут быть как меньше, так и больше, чем в объеме, а их подвижности меньше. Толщина этой области порядка длины экранирования, и обычно составляет ничтожную долю от линейных размеров поперечного сечения массивных образцов, используемых для определения удельного сопротивления. Поэтому, если концентрация носителей заряда в ней не очень велика по сравнению с концентрацией носителей заряда в объеме или меньше ее, то изменением сопротивления образца из-за изменения удельного сопротивления в приповерхностной области можно пренебречь.

Если концентрация носителей заряда в приповерхностной области намного больше, чем концентрация в объеме (возникновение такой ситуации наиболее вероятно в высокоомных полупроводниках, когда концентрация носителей заряда в объеме мала), то через тонкую, но хорошо проводящую приповерхностную область может проходить значительная часть протекающего через образец тока – имеет место поверхностная утечка тока. Еще одной причиной возникновения поверхностной утечки тока может явиться, например, адсорбция на поверхность образца влаги из атмосферы.

Ток поверхностной утечки уменьшает сопротивление образца и приводит к занижению измеряемого удельного сопротивления, что при измерениях необходимо устранять. Поскольку соотношение между током через объем и поверхностной утечкой зависит от геометрии образца, то, уменьшая его длину и увеличивая размеры поперечного сечения, в принципе всегда можно реализовать условия, когда утечка мала. Однако такой путь приемлем, лишь когда есть возможность изготавливать достаточно большие образцы. Иная возможность исключения поверхностной утечки применение образца с охранным кольцом (рис. 3).

На один из торцов образца нанесен контакт К, окруженный охранным кольцом О, расстояние от

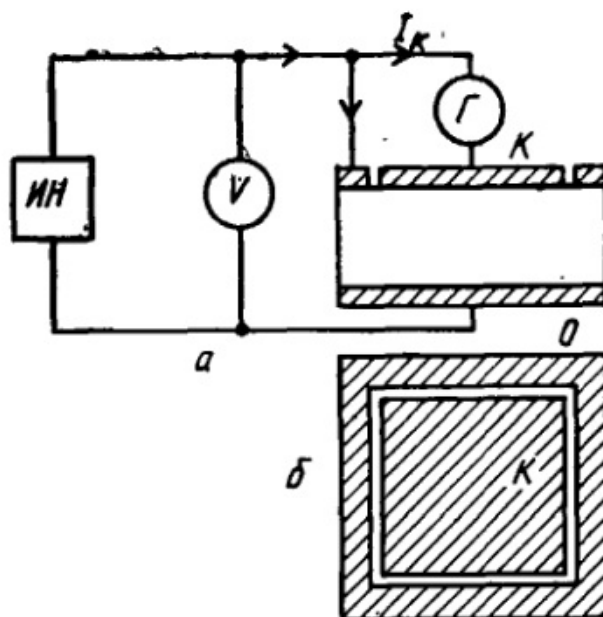


Рис. 3. Схема для измерения удельного сопротивления с охранным кольцом (а) и вид образца в торец (б)

краев которого до контакта К намного меньше длины образца. Контакт на противоположном торце образца сплошной. Сопротивление прибора Г, измеряющего ток через центральный контакт К, мало, соответственно мало по сравнению с приложенным к образцу напряжением U падение напряжения на этом приборе. Поэтому можно считать, что контакт К и охранный кольцо эквипотенциальны. В рассматриваемых условиях ток поверхностной утечки проходит только через охранный кольцо, поэтому прибором Г он не измеряется. Этот прибор измеряет ток, проходящий через центральный контакт К, а затем объем образца. Его величина определяется формулой $I_K = \rho \frac{S_K U}{\rho a}$ (S_K — площадь контакта К), которая позволяет найти удельное сопротивление объема образца.

Двухзондовый метод измерения удельного сопротивления

Реализация рассмотренных в предыдущем параграфе методов измерения удельного сопротивления ρ требует создания на образце омических контактов, а в случае контактов с повышенным сопротивлением эти методы дают завышенные значения удельного сопротивления. Такого недостатка лишены зондовые методы.

Схема двухзондового метода измерения изображена на рис. 4. На торцы образца нанесены контакты K_1 и K_2 , а на его поверхности на расстоянии l друг от друга установлены два точечных зонда Z_1 и Z_2 . Между ними включен нулевой прибор Г и потенциометр П. В качестве зондов могут быть использованы, например, заостренные проволочки.

Значение удельного сопротивления определяется следующим образом. Через образец от источника ИТ пропускают ток I , который измеряет прибор А. Затем, изменяя напряжение на потенциометре П, добиваются отсутствия тока через прибор Г. В этом случае напряжение на потенциометре П равно падению напряжения, создаваемого током I на участке образца между зондами, т. е.

$$U_{\Pi} = IR = I\rho \frac{l}{S},$$

где R — сопротивление участка образца между зондами; S — площадь поперечного сечения образца.

Существует мнение, что при таком способе измерения ρ полностью исключается влияние на результаты измерений сопротивлений контактов. Однако при больших $R_{Z1} + R_{Z2}$ погрешность может

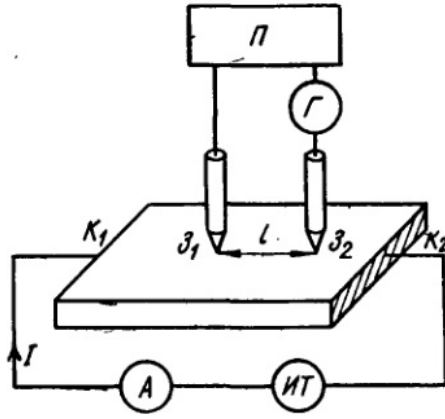


Рис. 4. Схема измерения удельного сопротивления двухзондовым методом

быть столь большой, что проводить измерения бессмысленно. Чтобы сопротивление зондов не сказывались, они должны быть намного меньше $R + R_r$. Дальнейшее снижение их величины не обязательно. При

$$R_{з1} + R_{з2} + R_{\Gamma} \ll R$$

погрешность минимальна и равна $i_{\Gamma min}/I$.

Условие малости тока через зонды и, следовательно, пренебрежимо малого падения напряжения на их сопротивлениях можно обеспечить, если между зондами включить не потенциометр с нулевым прибором, а достаточно высокоомный вольтметр V , как это показано на рис.5.

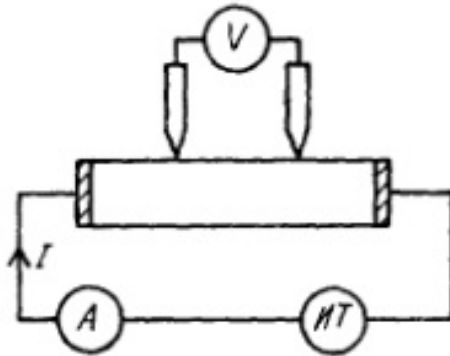


Рис. 5. Схема измерения с высокоомным вольтметром, включенным между зондами

В этом случае измеряемое вольтметром напряжение

$$U_V = IR / \left(1 + \frac{R_{з1} + R_{з2} + R}{R_V}\right),$$

где R_V - его внутреннее сопротивление. Для

$$R_{з1} + R_{з2} + R \ll R_V$$

$U_V = IR$ и ρ можно определять по формуле $U_{\Pi} = IR = I\rho \frac{l}{S}$, заменив в ней U_{Π} на U_V . Если компенсация напряжения между зондами происходит не автоматически, то замена потенциометра вольтметром существенно ускоряет измерения. В связи с возможностью такой замены отметим, что в идеальном случае ($i_{\Gamma min} = 0$) потенциометр можно рассматривать как прибор с бесконечно большим входным сопротивлением по постоянному току. В реальном случае ($i_{\Gamma min} \neq 0$)— это прибор с большим сопротивлением.

Известно, что переменные электромагнитные поля, существующие в сети, от которой питается установка, и в окружающем ее пространстве, могут приводить к возникновению в ней паразитных сигналов - наводок. Переменные электромагнитные поля непосредственно создают переменные наводки и в связи с этим может создаться впечатление, что рассматриваемые схемы двухзондового метода, работающие на постоянном токе, не должны быть подвержены действию наводок переменными электромагнитными полями, если период изменения этих полей намного меньше, чем время регистрации сигналов измерительными приборами установки, т. е. наводки большой частоты не должны регистрироваться измерительным прибором из-за его инерционности. Однако это не так. Рассмотренные выше схемы подвержены действию наводок от переменных электромагнитных полей большой частоты если контакты к образцу (зондовые или токоподводящие) имеют нелинейные вольт-амперные характеристики. В этом часто реализующемся случае протекание через контакты переменного тока наводки приводит к возникновению постоянной составляющей тока, которая регистрируется измерительным прибором и мешает проведению измерений. При этом борьба с наводкой тем труднее, чем меньше полезный регистрируемый сигнал.

Применяют два способа борьбы с наводками: экранирование и заземление экспериментальной установки, первый из которых более сложен и трудоемок. Схемы измерения удельного сопротивления двухзондовым методом обладают особенностью, которая при измерениях на высокоомных образцах делает второй способ — заземление — не очень эффективным. Из рис.4 видно, что в такой схеме есть два контура: питания образца (источник тока ИТ, прибор А и образец) и измерения напряжения между зондами (потенциометр П, нулевой прибор Г и участок образца между зондами). Соединить с землей можно только одну из точек схемы. Если это какая-либо точка первого контура, то второй контур оказывается соединенным с землей через большие сопротивления участков образца между зондами и токоподводящими контактами. При $\rho \approx 10^{10} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ эти сопротивления могут иметь, например, величину 10^{11} Ом , т. е. второй контур практически не заземлен. При соединении с землей точки второго контура подобная ситуация возникает для первого контура. Соединить через небольшое сопротивление с землей оба контура схемы не удастся. То же самое можно сказать относительно схемы измерения двухзондовым методом, изображенной на рис.5. Задача соединения с землей через небольшие сопротивления обоих контуров решается в схеме, изображенной на рис.6.

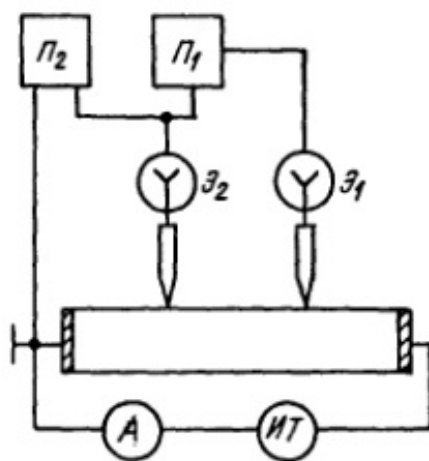


Рис. 6. Схема измерения с высокоомным вольтметром, включенным между зондами

От схемы рис.4 она отличается наличием еще одного потенциометра P_2 и двумя нулевыми приборами \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 , в качестве которых использованы электрометры (вольтметры с высоким сопротивлением). Изменяя напряжения на потенциометрах P_1 и P_2 , можно добиться нулевых показаний обоих приборов \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 . В такой ситуации напряжение на потенциометре P_1 равно падению напряжения между зондами, зная которое можно по формуле $U_{\Pi} = IR = I\rho \frac{l}{S}$ определить величину ρ . Роль потенциометра P_2 сводится к тому, что через его внутреннее сопротивление заземляется контур измерения напряжения между зондами.

Схема с двумя потенциометрами менее подвержена наводкам, чем схема с одним потенциометром. С ее помощью удастся без экранирования измерять удельные сопротивления до $10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

Однозондовый метод измерения удельного сопротивления

Схема однозондового метода измерения (рис.7) получается из схемы двухзондового изображенной на рис.4, если одну из клемм потенциометра соединить с токоподводящим контактом. Устанавливаемый на поверхности зонд 3 сделан подвижным, т. е. расстояние x_3 от токоподводящего контакта K_1 до него можно изменять.

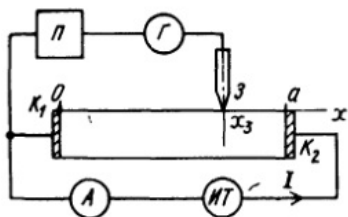


Рис. 7. Схема измерения однозондовым методом

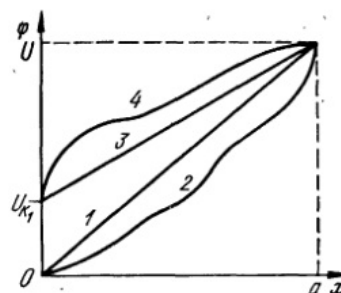


Рис. 8. Типы распределения потенциала вдоль образца

Проведя измерение падения напряжения φ между контактом K_1 и этим зондом при двух значениях расстояния x_{31} и x_{32} , можно определить величину удельного сопротивления по формуле $\rho = \frac{S}{I} \cdot \frac{\varphi(x_{31}) - \varphi(x_{32})}{x_{31} - x_{32}}$. Влияние сопротивлений контактов на результаты такого измерения удельного сопротивления будет таким же, как и в случае измерений двухзондовым методом.

Рассматриваемую схему можно использовать для проверки однородности образца, определения в неоднородном по длине образце зависимости удельного сопротивления от x , проверки омичности контактов и определения величин сопротивлений токоподводящих контактов. Возможные типы зависимостей φ от x показаны на рис.8. Их дифференцирование позволяет по формуле

$$\rho(x) = \frac{S}{I} \frac{d\varphi(x)}{dx}$$

определить ρ в различных точках образца.

Зависимость 1 соответствует однородному образцу с сопротивлением контакта $R_K = 0$ — омическим контактом; зависимость 2 — неоднородному образцу с таким контактом. Скачок напряжения U_K , при $x=0$ на зависимости 3 обусловлен падением напряжения на контактном сопротивлении R_K . Его величина $R_K = U_K/I$. Толщина слоя, обусловившего возникновение этого сопротивления, мала и с помощью зонда «прощупать» распределение в нем сопротивления не удастся. Зависимость 3 соответствует однородному образцу с неомическим контактом K_1 , 4- неоднородному образцу с таким же контактом K_1 .

Все зависимости на рис.8 соответствуют образцам с омическими контактами K_2 при $x = a$. Если этот контакт неомичен, то при $x = a$ будет наблюдаться скачок напряжения.

Четырехзондовый метод измерения удельного сопротивления

Во всех рассмотренных выше методах измерения удельного сопротивления нужны образцы правильной и вполне определенной формы. Однако в условиях производства часто возникают задачи, когда это условие нельзя выполнить.

Например, если нужно узнать сопротивление материала в различных участках полупроводникового слитка, не нарушая его целостность, либо определить удельное сопротивление материала в

пластине неправильной геометрической формы. Такие задачи привели к развитию специальных методов определения удельного сопротивления, не предъявляющих жестких требований к геометрии используемых образцов. К ним относятся методы, описанные в настоящем и следующем пунктах. Пусть на поверхность образца установлено четыре точечных зонда, как это показано на рис. 3.9.

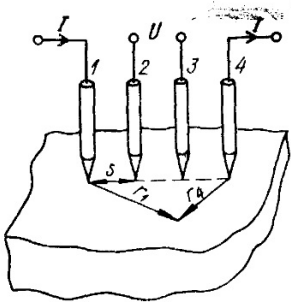


Рис. 9. Реализация четырехзондового метода

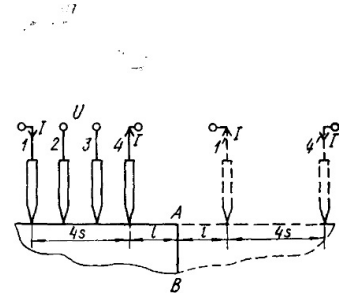


Рис. 10. Образец в виде полупространства с четырьмя токоведущими зондами

Расстояние между соседними зондами s , через два крайних зонда 1 и 4 проходит ток I , который создает некоторую разность потенциалов U между средними зондами 2 и 3. Естественно, что эта разность потенциалов является функцией силы тока I , удельного сопротивления образца ρ , расстояния v и геометрических размеров образца. Найдем связь U и I , считая, что образец можно рассматривать как полупространство: его размеры и расстояния от зондов до границ образца намного больше s , поэтому линии тока протекают только у одной поверхности образца - той на которой установлены зонды.

Известно, что электрическое поле постоянного тока формально аналогично электростатическому полю. Воспользуемся этим. Напряженность электрического поля, возникающего в образце при вытекании через зонд 1 тока I на расстоянии r_1 от зонда,

$$Y_1 = \rho j_1 = \frac{\rho I}{2\pi r_1^2},$$

где j_1 - плотность тока. Принимая, что при $r_1 \rightarrow \infty$ потенциал рассматриваемого поля $\varphi \rightarrow 0$, находим

$$\varphi_1(r_1) = - \int_{\infty}^{r_1} E_1 dr_1 = \frac{\rho l}{2\pi r_1}$$

Аналогично потенциал φ_4 , поля, возникающего при вытекании через зонд 4 тока I на расстоянии r_1 от него,

$$\varphi_4(r_4) = - \frac{\rho l}{2\pi s}.$$

Данные выражения подобны выражениям потенциалов точечных зарядов. Потенциал точки, отстоящий от зондов 1 и 4 соответственно на расстоянии r_1 и r_4 равен $\varphi_1(r_1) + \varphi_4(r_4)$. Учитывая это, получаем, что потенциал зонда 2 - $U_2 = \varphi_1(s) + \varphi_4(2s)$, зонда 3 - $U_3 = \varphi_1(2s) + \varphi_4(s)$. Разность потенциалов между ними

$$U = U_2 - U_3 = \frac{\rho l}{2\pi s}$$

откуда по U и I определяется удельное сопротивление ρ .

Измерение разности потенциалов U в четырехзондовом методе производится как и в двухзондовом; влияние на результаты измерений неомичности контактов потенциальных зондов 2 и 3 такое же. В образце конечных размеров ход линий тока изменяется по сравнению со случаем полубесконечного образца, вследствие чего изменяется функциональная связь U с I . Проиллюстрируем это в случае,

когда образец можно рассматривать как четверть пространства и зонды имеют расположение, показанное на рис.10 сплошными линиями. Добавившаяся по сравнению со случаем рис.9 вертикальная плоскость АВ изменяет ход линий тока таким образом, что на ней нормальная составляющая плотности тока равна нулю. Учитывая это, нетрудно понять, что электрическое поле в рассматриваемом образце с двумя токоподводящими контактами 1 и 4 такое же, как и в изображенном на рис. 3.10 сплошными и штриховыми линиями образце, представляющем полупространство с четырьмя токоподводящими зондами 1, 4 и 1', 4'. Из выражения для потенциала, создаваемого протеканием тока через каждый из этих зондов, после вычислений, подобных проделанным при получении последней формулы, можно показать, что

$$\rho = \frac{U}{I} 2\pi s F'\left(\frac{l}{s}\right),$$

где

$$F'\left(\frac{l}{s}\right) = \left(1 + \frac{1}{1 + 2l/s} - \frac{1}{2 + 2l/s} - \frac{1}{4 + 2l/s} + \frac{1}{5 + 2l/s}\right)^{-1}$$

l -расстояние от зонда 4 до ограничивающей образец вертикальной плоскости АВ. При $s \ll 2l$ выражение приходит к виду

$$U = U_2 - U_3 = \frac{\rho l}{2\pi s}$$

Четырехзондовый метод измерения широко используется в процессе производства полупроводниковых материалов и при создании полупроводниковых приборов. Выражения, связывающие U и I получены для самых разнообразных случаев: образцов в виде пластин, пластин с одной поверхностью, покрытой металлом, брусков и др. При расстояниях от зондов до поверхностей образца, значительно превышающих s , эти выражения упрощаются и образец можно рассматривать как полупространство.

Измерение удельного сопротивления пластин произвольной формы

При определении удельного сопротивления пластин произвольной формы используется метод Ван дер Пау. В этом методе на боковой поверхности пластины толщиной d создаются четыре линейных контакта 1—4 (рис.11). Через контакты 1 и 2 пропускают ток I_1 и измеряют разность потенциалов U_1 между контактами 3 и 4. Измерение производится при помощи тех же схем, что и в случае двухзондового и четырехзондового методов. Затем ток I_2 пропускают через контакты 2 и 3 и измеряют разность потенциалов U_2 между контактами 1 и 4.

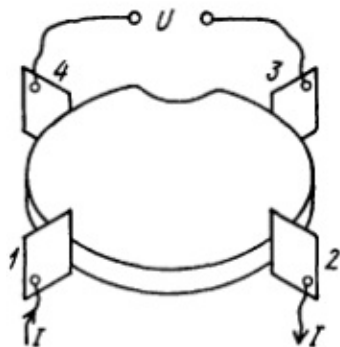


Рис. 11. Расположение линейных контактов 1-4 на образце

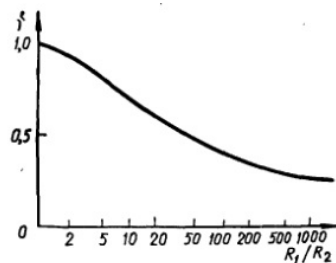


Рис. 12. Зависимость f от R_1 и R_2

Величины $R_1 = \frac{U_1}{I_1}$ и $R_2 = \frac{U_2}{I_2}$ связаны между собой соотношением

$$\exp(-\pi \frac{d}{\rho} R_1) + \exp(-\pi \frac{d}{\rho} R_2) = 1$$

Получить аналитическое выражение ρ через R_1 и R_2 не удастся. Введем в рассмотрение величину f с помощью выражения

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} \cdot \frac{R_1 + R_2}{2} f.$$

Получаем уравнение

$$\operatorname{ch} \left[\frac{\ln 2}{f} \frac{R_1/R_2 - 1}{R_1/R_2 + 1} \right] = \frac{1}{2} \exp\left(\frac{\ln 2}{f}\right),$$

откуда следует, что f зависит от R_1/R_2 . Полученная из решения уравнения зависимость f от R_1/R_2 представлена на рис.12.

Используя даваемые ей значения f по измеренным R_1 и R_2 , можно по формуле вычислить удельное сопротивление. При симметричном расположении контактов на симметричном образце, например на круге или квадрате, $R_1 = R_2 = R$ и, $f=1$; $\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} R$.

Индуктивный и емкостный методы измерения удельного сопротивления

Рассмотрим катушку индуктивности, через которую протекает ток с частотой ω и эффективной силой I_3 . Импеданс катушки $Z = R + iL\omega$. Обозначим среднее по времени значение подводимой к катушке мощности W , а соответствующее значение энергии ее магнитного поля E , тогда

$$R = \frac{W}{I_3^2}; L = \frac{E}{I_3^2}$$

Поддерживая силу тока I_3 , неизменной, введем в катушку полупроводниковый образец. Переменное магнитное поле вызовет в нем ток, величина которого зависит от удельного сопротивления образца. Протекание этого тока и обусловленное этим нагревание образца приведет к увеличению W , а следовательно, R . Магнитное поле индуцированного в образце тока, складываясь с полем тока в катушке, приводит к изменению E и L . Изменения сопротивления и индуктивности ΔR и ΔL зависят от удельного сопротивления образца, что позволяет определять последнее по этим величинам. Связь ΔR и ΔL ρ может быть просто рассчитана только в некоторых случаях. Чаще ее находят экспериментально, используя образцы с известным удельным сопротивлением.

Значения ΔR и ΔL можно измерить мостом переменного тока. Однако в общем случае в этом нет необходимости, а для определения ρ достаточно регистрировать какую-либо величину, функционально связанную ΔR и ΔL , а следовательно с ρ .

Существуют установки, в которых катушка индуктивности, содержащая образец, входит в состав колебательного контура, добротность которого функционально связана с удельным сопротивлением образца. В них измеряется либо сама добротность контура, либо зависящая от нее величина. В таких установках используются плоские катушки, помещаемые на поверхность образца, либо катушки с ферритовыми сердечниками и специальными конструктивными особенностями, позволяющими вводить электромагнитное поле в образец. Катушки индуктивности в виде соленоидов используются реже.

Пример конструкции катушки с ферритовым сердечником показан на рис.13. В ферритовом тороидальном сердечнике 1 диаметром несколько миллиметров сделана прорезь шириной несколько десятых миллиметр, куда вставлены покрытые серебром медные пластинки 2. Катушка подключается к Q-метру, работающему на частоте 20 МГц. Из-за скин-эффекта высокочастотное поле выходит из прорези в сердечнике и действует на образец 3. Добротность катушки зависит от удельного сопротивления образца. Измерения с разными катушками возможны в диапазоне $10^{-4} \dots 20 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, на высокоомных образцах они не используются, т. к. малые индукционные токи приводят к слабому изменению параметров катушки.

При емкостном методе измерения ρ внесение образца в конденсатор изменяет его импеданс: активное сопротивление и емкость. Фиксация этих изменений позволяет определить удельное сопротивление вносимого образца. При этом, как и в случае индуктивного метода, не обязательно фиксировать само изменение импеданса, а можно фиксировать функционально связанные с ним величины, например добротность контура, в состав которого входит конденсатор с образцом. Рассматриваемым методом трудно измерять малые удельные сопротивления, так как низкоомные образцы мало изменяют активное сопротивление конденсатора. Описаны измерения больших удельных сопротивлений с нижним пределом до $10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

В большинстве случаев при использовании бесконтактных методов погрешность измерений больше, чем при использовании контактных, поэтому они распространены меньше.

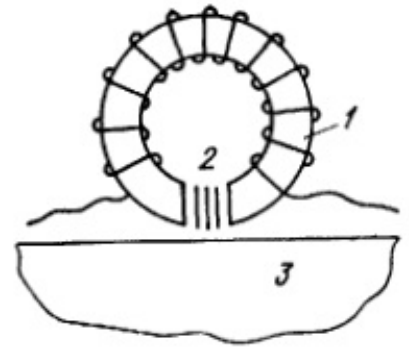


Рис. 13. Катушка индуктивности с ферритовым сердечником, применяемая при определении ρ