

## ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ГАЗОАНАЛИЗАТОРА

В основе работы полупроводниковых сенсоров на оксидных пленках используется эффект изменения электрического сопротивления некоторых полупроводниковых материалов (поверхностей монокристаллов, пленок), возникающего вследствие адсорбции газа. Поэтому возникает необходимость в определении удельного электрического сопротивления полупроводникового образца, лежащего в основе газоанализатора при нормальных условиях [1].

Большинство методов измерения удельного сопротивления основывается на определении разницы потенциалов рабочего участка образца, который находится под действием электрического тока. Для полупроводниковых приборов часто применяют зондовые методы, которые не требуют подготовки образца. Одним из наиболее эффективных методов является четырехэлектродный метод измерения удельного сопротивления.

Сущность четырехэлектродного метода измерения удельного сопротивления заключается в следующем. На плоской поверхности образца вдоль одной линии размещаются четыре металлических электрода (рис. 1)

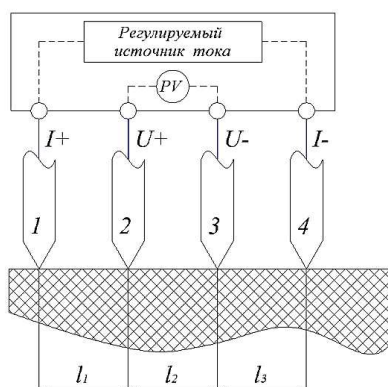


Рисунок 1 – Схема четырехэлектродного измерения удельного сопротивления

Через два внешних электрода (1 и 4) пропускают ток  $I$ , а между двумя внутренними электродами (2 и 3) измеряют напряжение  $U_{23}$ . Потенциалы контактов электродов 2 и 3 будут определяться процессом

растекания потенциалов от токовых электродов 1 и 4, через которые протекает ток  $I$  от регулируемого источника тока. С учетом направления протекания тока напряжение между электродами 2 и 3 можно будет определить [2]:

$$U_{23} = U_2 - U_3 = \frac{I \cdot \rho}{2 \cdot \pi} \cdot \left( \frac{1}{l_1} - \frac{1}{l_1 + l_2} - \frac{1}{l_2 + l_3} + \frac{1}{l_3} \right),$$

где  $l_i$  – расстояние между электродами измерительной схемы.

По измеренным значениям напряжения  $U_{23}$  и заданным значением тока  $I$ , протекающего между электродами 1 и 4, можно определить удельное сопротивление образца:

$$\rho = \frac{U_{23}}{I_{14}} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\frac{1}{l_1} - \frac{1}{l_1 + l_2} - \frac{1}{l_2 + l_3} + \frac{1}{l_3}}.$$

Если обеспечить равенство расстояний между электродами  $l$ , то удельное сопротивление образца можно будет определить через выражение:

$$\rho = \frac{U_{23}}{I_{14}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot l.$$

В случае тонких проводящих пленок или слоев, которые получены методом напыления, метод четырехэлектродного измерения удельного сопротивления будет также применим. Однако, необходимо будет учесть, что для тонкой пленки распределение потенциала можно считать двумерным и сфера распределения потенциала будет заменяться окружностью если подложка не будет являться проводящей средой и будут отсутствовать токи утечки. Тогда напряженность электрического поля для плоской проводящей поверхности или пленки будет:

$$E = \frac{I \cdot \rho_{\Pi}}{2 \cdot \pi \cdot r},$$

где  $r$  – радиус окружности распределения потенциала,  $\rho_{\Pi}$  – удельное поверхностное сопротивление слоя.

Потенциал любой точки проводящей поверхности, удаленной от электрода с током  $I$  на радиус  $r$  можно будет определить:

$$U(r) = \frac{I \cdot \rho_{\Pi}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln r + C.$$

При использовании четырехэлектродного измерителя по схеме с двумя токовыми электродами 1 и 4 (рис. 1) потенциал любой точки слоя будет определяться:

$$U(r) = \frac{I \cdot \rho_{\Pi}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln r_1 - \frac{I \cdot \rho_{\Pi}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln r_4 = \frac{I \cdot \rho_{\Pi}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{r_1}{r_4},$$

где  $r_1$  – расстояние от точки до электрода 1,  $r_4$  – расстояние от точки до электрода 4.

Если обеспечить равенство расстояний между электродами, то напряжение между электродами 2 и 3 можно будет найти:

$$U_{23} = U_{23} = U_2 - U_3 = \frac{I \cdot \rho_{\text{п}}}{2 \cdot \pi} \cdot \left( \ln \frac{l}{2l} - \ln \frac{2l}{l} \right) = \frac{I \cdot \rho_{\text{п}}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{1}{4}.$$

Следовательно, удельное сопротивление проводящего слоя будет:

$$\rho_{\text{п}} = \frac{U_{23}}{I} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\ln \frac{1}{4}} \approx 4,53 \cdot \frac{U_{32}}{I}.$$

Для повышения точности измерений необходимо иметь источник тока с высоким входным сопротивлением, а в качестве вольтметра применять цифровые вольтметры с высоким входным сопротивлением, что позволит исключить использование компенсационного метода измерения и упростить схему измерительного прибора. При этом погрешность измерения будет определяться измерительной цепью тока и напряжения, а также погрешностью выставления расстояний между электродами.

Для исключения нагрева образца величину тока между электродами 1 и 4 необходимо ограничить величиной не более 1 мА.

Четырехэлектродный метод можно применять для образцов с однородной поверхностью, линейные размеры которого не превышают 4-5 расстояний между электродами  $l$ , а толщина образца  $h \ll l$ . При этом расстояние между электродами не превышает 1 мм.

При учете всех ограничений и требований к полупроводниковому образцу, метод измерения, который был рассмотрен выше, можно сделать вывод, что удельное сопротивление поверхностного слоя газоанализатора наиболее эффективно измерять четырехэлектродным методом с использованием цифровых измерительных устройств.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Адаптивная цифровая фильтрация для обработки сигналов от полупроводниковых пленочных газовых сенсоров / И. О. Оробей [и др.] // Химическая технология и техника : материалы 86-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, Минск, 31 января - 12 февраля 2022 г. - Минск : БГТУ, 2022. – С. 322-324.

2. Свистова Т.В. Методы исследования материалов и структур электроники: учеб. пособие / Т.В. Свистова. Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2013. 225 с