

УДК 621.721.07**Сравнение методик измерения поверхностного сопротивления тонкопленочного слоя меди на ПВДФ пленке**Кислов Кирилл Александрович ⁽¹⁾, Макарова Камила Туреккановна ⁽²⁾*Студент 4 курса ⁽¹⁾, магистр 2 года ⁽²⁾,
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»
Московский государственный технический университет**Научный руководитель: К. М. Мусеев,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в
машиностроении»*

Полимерные сегнетоэлектрические пленки на основе поливинилденфторида (ПВДФ) могут успешно применяться вместо PZT керамики в гидрофонах, микрофонах, датчиках механического давления и вибрации, за счет высокого пьезоэлектрического коэффициента среди полимерных материалов до 30 пКл/Н, широкой полосы пропускания от 10 Гц до 1 МГц, на порядок меньшего импеданса, близкого к импедансу воды и тканям человека, а также свойствам химической инертности и гибкости [1,2].

Ключевым элементом устройств на основе ПВДФ пленки является чувствительный элемент в виде ПВДФ пленки с нанесенными на нее электродами. Electrodes служат для снятия и подачи электрического сигнала с пьезоэлектрической пленки и на неё. В качестве материала для электродов зачастую используется медь. Качество и параметры тонкопленочного медного электрода существенно влияют на работу датчика. Поверхностное сопротивление, один из параметров электрода, показывает, насколько эффективно заряд будет передаваться от ПВДФ пленки к измерительной аппаратуре. Если сопротивление электрода велико, часть сигнала будет теряться в виде тепла, искажая результаты измерений, а значит, что его измерение и контроль являются важными этапами при изготовлении чувствительных элементов для гибких сенсоров.

На сегодняшний день для измерения поверхностного сопротивления чаще всего используются два метода: четырехзондовый (метод Кельвина) и метод ван дер Пау.

Четырехзондовый метод Кельвина основан на использовании четырех игольчатых зондов (рис. 1), два из которых пропускают ток, а два других измеряют падение напряжения [3].

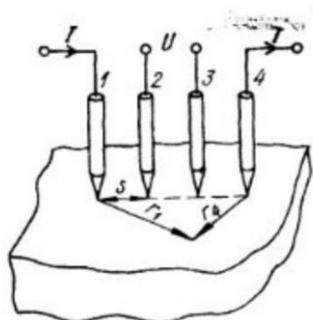


Рисунок 1 – Схема четырехзондового метода Кельвина

Данный метод позволяет минимизировать влияние контактного сопротивления и повысить точность измерений.

Метод ван дер Пау предполагает размещение четырех контактов по краям образца произвольной формы (рис. 2) [4].

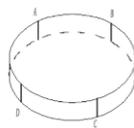


Рисунок 2 – Расположение контактов при измерении поверхностного сопротивления методом ван дер Пау

Измерения проводятся в различных конфигурациях, что позволяет вычислить сопротивление даже для анизотропных материалов.

Для эксперимента по сравнению этих двух методов на подложку из пленки ПВДФ нанесены тонкие пленки меди разной толщины методом магнетронного распыления на установке МГТУ-1. Результаты измерения поверхностного сопротивления представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения поверхностного сопротивления, измеренного двумя методами

Толщина электрода, нм	Значение поверхностного сопротивления, измеренного методом Кельвина, Ом/□			Значение поверхностного сопротивления, измеренного методом ван дер Пау, Ом/□
	Разброс	Среднее значение	Доверительный интервал	
50	1,490 – 2,093	1,648	1,648 ± 0,193	1,599
150	1,413 – 2,75	1,386	1,386 ± 0,454	1,871
200	0,435 – 0,632	0,527	0,527 ± 0,053	1,778
300	0,327 – 0,561	0,452	0,452 ± 0,047	0,736
500	0,150 – 0,415	0,313	0,313 ± 0,075	2,213

Таким образом, для измерения поверхностного сопротивления тонкопленочного слоя меди на ПВДФ пленке четырехзондовый метод предпочтительнее благодаря удобству измерения, так как для образцов с разной геометрией будет требоваться постоянная перепайка контактов, так как зонды должны попадать ровно в край образца. Метод Кельвина показал более высокую точность, так как значения поверхностного сопротивления с увеличением толщины электрода должны уменьшаться, что не показал метод ван дер Пау с резкими увеличением поверхностного сопротивления с увеличением толщины. Такой разброс в значениях при измерении поверхностного сопротивления методом Кельвина может возникать из-за неоднородности электродов. Для электродов с толщинами 50, 150 и 300 нм значения поверхностного сопротивления, полученные двумя методами, практически совпадают, а для толщин 200 и 500 нм сильно отличаются, что может быть связано с погрешностью измерений.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSFN-2025-0004).

Литература

1. Кочервинский В.В. Применение сегнетоэлектрических полимеров в технике и медицине. М.: Palmarium Academic Publishing, 2021.
2. Кочервинский В.В. Свойства и применение фторсодержащих полимерных пленок с пьезо- и пироактивностью. М.: Успехи химии, 1994.
3. R. Lin, Y. Chen, J. Zhang Advanced four-point probe sheet resistance measurements of ultrasonic conductive films. M.: Review of Scientific Instruments, 2020.
4. D. Kong Contactless van der Pauw method for carrier density determination in topological insulators. M.: Physical Review Applied, 2018.