

Бесконтактный метод измерения сопротивления

© Р. Ринкунас, С. Кускявичюс

Вильнюсский университет,

LT-10222 Вильнюс, Литва

e-mail: ringaudas.rinkunas@ff.vu.lt, Status.Kuskevicius@sc.vu.lt

(Поступило в Редакцию 20 декабря 2007 г.)

Предложен бесконтактный метод измерения сопротивления образцов. Метод позволяет вычислить распределение сопротивления образца с точностью до 0.1 nm. Сопротивления образцов можно измерять в пределах $10^7 - 10^{13} \Omega$ (полиэтилен, окись кремния и другие материалы). Во время измерения сопротивления образцы должны находиться на непроводящей подложке. Такая система заряжается (или разряжается) иглообразным электризатором и при этом регистрируется импульс тока зарядки (или разрядки). Этот импульс увеличивается с ростом проводимости исследуемого образца, поэтому по величине импульса можно измерить сопротивление исследуемого образца. Этим методом можно оперативно определить, например, фотопроводность материалов, зависимость их сопротивления от температуры, установить, как влияет на проводимость исследуемого образца, например, влажность окружающего воздуха или находящийся рядом источник радиоактивности. Если сопротивление исследуемого образца известно, то предложенным методом можно определить, например, влажность окружающей среды, освещенность или интенсивность радиоактивного излучения.

PACS: 52.80.-s, 72.80.-r

Введение

Определить сопротивление различных веществ можно традиционными методами, например, напылить в вакууме на исследуемый образец металлические контакты и измерить сопротивление образца [1,2]. Но такой метод является разрушительным, так как образец при напылении контактов портится. Существуют методы двух или четырех прямоугольных электродов [3], которые оказывают меньшее воздействие на исследуемый объект. В этих методах электроды прижимаются к поверхности исследуемого образца. Если образец не хрупкий, то он не повреждается. Но поверхность образца может быть неровной, тогда сложно надежно прижать электроды к исследуемому образцу и определить его проводимость.

Существует несколько неконтактных методов для определения сопротивления образцов [4–6]. В этих методах используется ионизирующее напряжение. Метод поверхностного сканирования [5] или метод дозированного заряжения [6] можно применять при исследовании образцов, имеющих неровную поверхность, а также исследовать легко повреждаемые механическим воздействием образцы. Методом дозированного заряжения [6] исследуется сразу вся поверхность образца, поэтому распределение сопротивления по его поверхности невозможно, поскольку образец находится на проводящей подложке, то измеряется его поперечное сопротивление. Кроме того, в этом методе применяется постоянно включенное высокое напряжение, которое создает ионизированную атмосферу, и образец постоянно заряжается. Поэтому сопротивление образца (особенно поверхностное) будет значительно отличаться от сопротивления этого же образца при первом пробое воздуха. Сканирующий метод [5] позволяет измерить распределение поверхностно-

го сопротивления образца, но в этом методе вообще не используется ионизирующее напряжение (используемый потенциал составляет лишь несколько вольт). Поэтому измеренное этим методом сопротивление может значительно отличаться от сопротивления того же образца, которое возникает при ионизирующих напряжениях.

При ионизирующих напряжениях сопротивление исследуемого образца будет зависеть не только от материала, из которого сделан образец, но и от влажности окружающего воздуха, от присутствия радиоактивного излучения и других условий. Поэтому при таких условиях проводимость разных веществ может в несколько раз отличаться от проводимости тех же веществ, измеренных, например, при использовании контактных электродов.

В настоящей работе представленным методом можно измерять сопротивление образцов, которое бывает в реальных рабочих условиях, когда на результаты измерения влияет как материал образца, так и окружающая среда, а также загрязнение поверхности исследуемого вещества. Кроме того, этот метод позволяет измерять проводимость островковых (не сплошных) слоев (измерить их проводимость, например, контактными способами невозможно).

Методика

Предложены две методики измерения сопротивления образцов. В первом случае (рис. 1) образец 1, помещенный на непроводящей подложке 8, укладывается на проводящую каретку и движется с постоянной скоростью под коронным электризатором 2. Образец и подложка заряжаются до определенного потенциала,

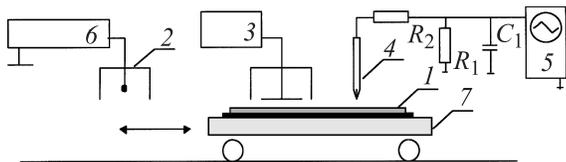


Рис. 1. Схема аппаратуры измерения проводимости образца: 1 — исследуемый образец на непроводящей подложке, 2 — электризатор, 3 — электродметр, 4 — иглообразный электрод, 5 — осциллограф, 6 — источник высокого напряжения, 7 — движущаяся каретка, 8 — непроводящая подложка.

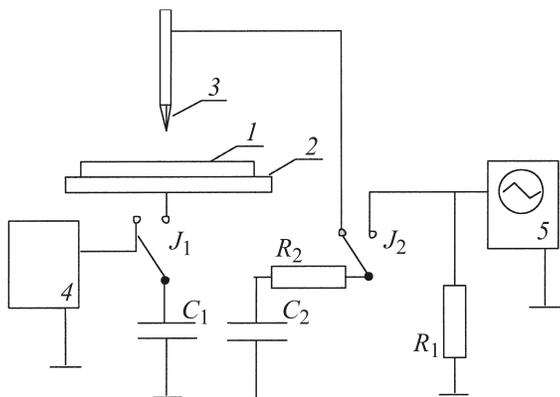


Рис. 2. Схема аппаратуры измерения проводимости образца: 1 — исследуемый слой, 2 — электропроводящая подложка, 3 — иглообразный электрод, 4 — источник высокого напряжения, 5 — осциллограф, 6 — непроводящая подложка.

который измеряется электродом 3. Далее образец попадает под иглообразный электрод 4. Расстояние между этим электродом и поверхностью образца подбирается таким, чтобы при данном потенциале образца между образцом и электродом возникал электрический пробой. Сопротивление R_2 ограничивает величину тока пробоя и тем самым предохраняет образец от повреждения. Во время пробоя часть поверхностного образца стекает через электрод 4 и сопротивление R_1 . При этом потенциал поверхности образца уменьшается и пробой прекращается. Ток пробоя регистрируется осциллографом 5. Величина этого тока (кроме других факторов) зависит также от площади окружности, с которой стекает заряд во время пробоя. Эта площадь увеличивается с ростом проводимости исследуемого образца. Например, если проводимость образца большая (металлическая пленка), то площадь, с которой стекает заряд во время пробоя между поверхностью образца и иглообразным электродом, будет самой большой — вся поверхность образца. Если проводимость образца будет небольшой, то и площадь, с которой стекает заряд, будет малой. Таким образом, регистрируемый импульс тока зависит от проводимости исследуемого образца.

После первого пробоя заряженный образец движется дальше и под иглообразный электрод попадает новый, полностью заряженный участок поверхности образца.

При этом возникает второй пробой между иглообразным электродом и поверхностью образца, и регистрируется второй импульс тока. Время между первым и вторым импульсами тока (или частота регистрируемых осциллографом 5 импульсов тока) зависит от скорости движения исследуемого образца (скорость движения каретки 7 можно установить постоянной) и от его проводимости: при увеличении проводимости образца частота импульсов тока уменьшается. Этим методом можно исследовать поверхностное распределение проводимости равномерно заряженных образцов. Также этим методом можно исследовать распределение заряда по поверхности образца. Во время измерения образец не портится и поэтому можно многократно повторять и уточнять измерения.

Другой метод измерения проводимости образца (рис. 2) можно применять при локальном исследовании образцов. В этом случае исследуется незаряженный образец 1, помещенный на подложке 6. Образец и непроводящая подложка помещается на проводящей подложке 2. Перед измерением конденсатор C_1 заряжается источником напряжения 4 до напряжения, необходимого для пробоя воздуха между поверхностью образца 1 и иглообразным электродом 3. Чем меньше расстояние между иглообразным электродом 3 и поверхностью образца 1, тем более мелкие участки поверхности образца можно исследовать (при расстоянии 0.1 мм — примерно такого же диаметра окружность заряжается на слабо проводящем образце). При включении переключателя J_1 поверхность образца заряжается до определенного потенциала. При этом также заряжается и конденсатор большей емкости C_2 (емкость C_2 намного больше емкости исследуемого образца, поэтому C_2 не оказывает влияния на зарядку исследуемого образца). Величина этого заряда измеряется при разряде конденсатора C_2 через сопротивление R_1 при включении переключателя J_2 .

В схеме можно и не использовать емкость C_2 и измерять импульс тока сопротивления R_1 сразу во время пробоя между электродом 3 и поверхностью образца 1, но тогда можно легко повредить осциллограф 5. Как и на рис. 1, сопротивление R_2 ограничивает ток разряда и позволяет сохранить образец целым. При увеличении проводимости образца увеличивается заряженная площадь образца, и поэтому в конденсаторе C_2 накапливается все больший заряд — по величине этого заряда можно судить о проводимости исследуемого образца.

Результаты и их обсуждение

Для того чтобы предложенными методами можно было измерять сопротивление образцов, необходимо сначала проградуировать аппаратуру — измерить импульсы тока зарядки (разрядки) образцов на тех же материалах, сопротивление которых известно (образцы разного сопротивления были изготовлены напылением в вакууме углеродных слоев различной толщины на

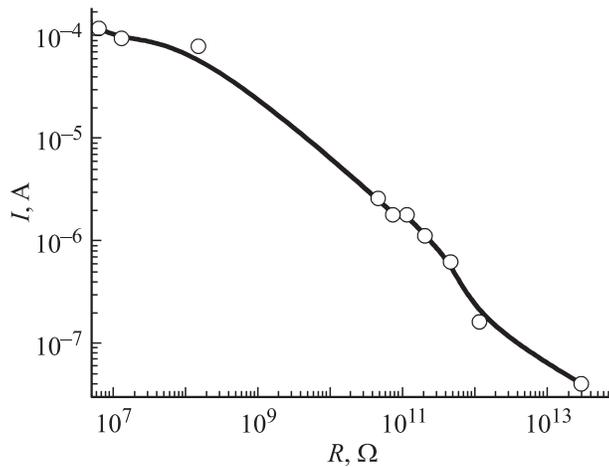


Рис. 3. Зависимость амплитуды импульса тока от сопротивления исследуемого материала (углеродных слоев разной толщины, напыленных в вакууме на лавсановые подложки). Измерения проведены методом, представленным на рис. 2.

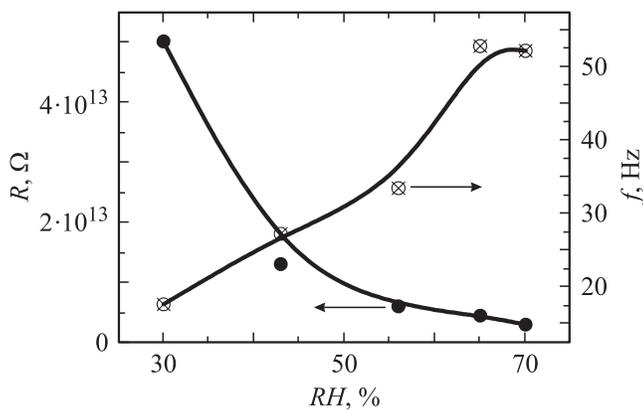


Рис. 4. Зависимость сопротивления образца и частоты импульсов тока от относительной влажности воздуха. Измерения проводились представленным на рис. 1 методом. Образец — лавсан. Его толщина $50 \mu\text{m}$.

лавсановые подложки; сопротивления полученных слоев измерялись электрометрами В7-30 и В7-29). Такая зависимость представлена на рис. 3.

Видно, что методом, представленным на рис. 2, можно измерять сопротивления материалов, которые находятся в диапазоне 10^7 – $10^{13} \Omega$ (метод, представленный на рис. 1, имеет такие же пределы измерения сопротивления). При измерении материалов, обладающих сопротивлением большим, чем $10^{14} \Omega$, импульс тока уже не уменьшается. Это происходит потому, что во время импульса зарядки образца заряд не успевает распространиться по поверхности образца (или по объему самого образца), и поэтому площадь заряженной поверхности образца не изменяется с уменьшением проводимости образца.

При сопротивлении образцов меньше $10^6 \Omega$ во время импульса зарядки заряд успевает распространиться по

всему образцу. Поэтому еще большее уменьшение сопротивления образца не увеличивает заряженной площади — при уменьшении сопротивления образца импульс тока не увеличится. Результаты, представленные на рис. 3, использовались для определения сопротивления образцов в дальнейших экспериментах.

Влажность окружающей среды оказывает большое влияние на измеряемое сопротивление образцов (рис. 4) — с ростом относительной влажности сопротивление образца уменьшается в несколько раз. Однако сопротивление этих же образцов, измеренное контактным способом при разной относительной влажности, было одинаковым. Поэтому можно утверждать, что реальное сопротивление образца, которое бывает во время электрического пробоя, может в десятки раз отличаться от сопротивления, которое измерялось в лабораторных условиях (например, контактными способами).

Результаты, представленные на рис. 4, можно также использовать для измерения относительной влажности воздуха — если имеется уже известный образец, то измеряя его сопротивление, можно установить относительную влажность воздуха. Таким образом, это еще один способ измерения влажности воздуха кроме уже известных способов, который для измерения влажности использует оптические свойства вещества [7,8], ультразвук [9], свойства волоса изменять свою длину при изменении влажности, взвешивание материалов, масс-спектрометрию и другие методы [10].

Предложенные методы можно использовать для измерения, например, фотоэлектрических характеристик образцов. Известно [11], что аморфные слои селена фоточувствительны. Зависимость сопротивления этого слоя можно измерить представленным на рис. 2 методом (рис. 5). Если слой освещать светом определенной длины волны, то можно измерить спектральную зависимость сопротивления образца. Результаты, представ-

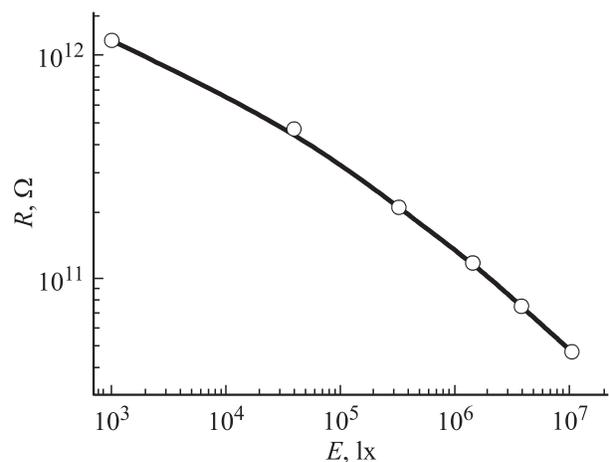


Рис. 5. Зависимость сопротивления аморфного селена от интенсивности белого света. Измерения проводились представленным на рис. 2 методом. Толщина слоя аморфного селена $100 \mu\text{m}$.

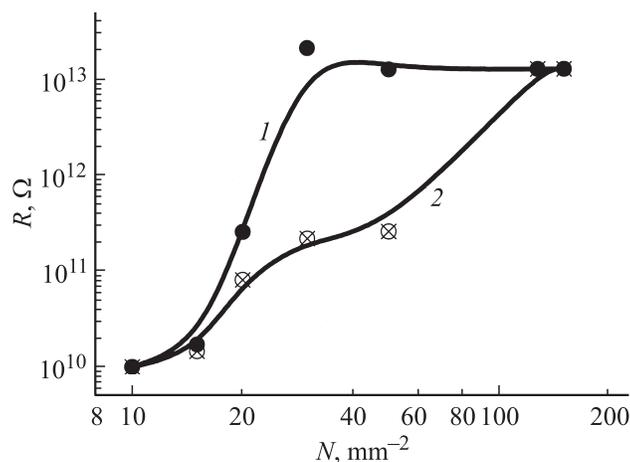


Рис. 6. Зависимость сопротивления образца от плотности алюминиевых ячеек, напыленных на его поверхность. Измерения проводились представленным на рис. 1 методом. Образец — аморфный селен толщиной $1 \mu\text{m}$ в темноте (1) или при освещении белым светом (2) интенсивностью $38\,000 \text{ lx}$.

ленные на рис. 5, можно так же успешно использовать для определения освещенности. Если слой освещать светом определенной длины волны, то можно измерить спектральную зависимость сопротивления образца. Результаты, представленные на рис. 5, можно также успешно использовать для определения освещенности.

Предложенные в настоящей работе методы измерения сопротивления можно сделать более чувствительными и измерять сопротивления больше, чем $10^{14} \Omega$ (например, тонкие пленки). Для этой цели на исследуемый образец следует в вакууме напылить металлическую сетку. Сетка формируется следующим образом: на поверхность образца наносятся мелкие, одинакового диаметра, частицы. На таком образом приготовленный образец напыляется металл. После напыления частицы удаляются и уже имеется образец с напыленной металлической сеткой. Плотность ячеек сетки определяется плотностью частиц, которые перед напылением металла были помещены на поверхность образца, а их диаметр равен диаметру ячейки сетки. Сетка работает следующим образом: образец заряжается до определенного потенциала (см. рис. 1), при этом заряжается как образец (в ячейках сетки), так и сама сетка. При приближении иглообразного электрода к поверхности образца происходит пробой воздуха, и заряд стекает со всей сетки (сетка напылена на всю поверхность образца). При этом создается разность потенциалов между сеткой и остальной поверхностью образца. С поверхности образца заряд будет стекать в сетку. Количество этого заряда будет увеличиваться с ростом проводимости самого образца, с уменьшением диаметра ячейки сетки и ростом плотности ячеек сетки (но при этом сетка должна оставаться целой — только тогда заряд сможет со всей сетки достичь иглообразного электрода во время пробоя воздуха).

Результаты работы усовершенствованного метода измерения сопротивления показаны на рис. 6. Для эксперимента был выбран тонкий слой аморфного селена (толщина слоя $1 \mu\text{m}$). Этот слой имел большое сопротивление (больше $10^{14} \Omega$), поэтому и при его освещении в темноте сопротивление, измеренное предложенными методами, было одинаковым — примерно $10^{14} \Omega$ (сопротивление больше $10^{14} \Omega$ несовершенствованными методами регистрируется как сопротивления $10^{14} \Omega$). Описанным выше методом на поверхность слоя были напылены различные металлические сетки с разной плотностью ячеек. Диаметр всех ячеек составлял приблизительно $0.08\text{--}0.1 \text{ mm}$. Очевидно, что при плотности ячеек 125 mm^{-2} , все ячейки сливаются в одно целое и имеется первоначальный слой без напыленной сетки, а при плотности ячеек меньше 10 mm^{-2} почти вся поверхность образца будет покрыта металлом — нечего будет измерять. При плотности ячеек $30\text{--}60 \text{ mm}^{-2}$ чувствительность усовершенствованного метода самая высокая. Это подтверждается тем, что в данном случае наблюдается самая большая разность измеренных сопротивлений между освещенным образцом и этим же образцом в темноте.

Для точного измерения сопротивления образца необходимо проградировать аппаратуру, применяя образцы из разных материалов, сопротивление которых известно, и конкретную сетку (надо получить данные, аналогичные представленным на рис. 3, но применяя сетку). Диаметр ячейки сетки определяет значение наибольшего сопротивления, которое можно измерить при ее использовании, а плотность ячеек сетки определяет чувствительность метода. Если удалось бы использовать не напыленную, а механически прижимаемую сетку, то измерения проводились бы более оперативно и образец бы не повреждался.

Во всех вышеописанных методах измерения сопротивления образцов время, через которое происходит это измерение, есть время разряда между поверхностью образца и иглообразным электродом. Если время измерения сопротивления значительно увеличить, то, конечно, и предел наиболее высоких измеряемых сопротивлений, увеличится. Для этой цели можно также использовать сетку, нанесенную на поверхность образца. Измерение происходит следующим образом: образец с сеткой заряжается импульсом тока с иглообразного электрода (методика измерения сопротивления представлена на рис. 2). Заряд с сетки стекает на поверхность образца (в ячейках сетки) и заряжает образец. Чем больше времени проходит после заряда сетки и чем больше проводимость образца, тем больший заряд окажется на его поверхности. Далее сетка может заземляться (на очень малое, но определенное время; при этом заряд с сетки стекает, а с образца — нет) или не заземляться. Далее образец с сеткой снова заряжается вторым импульсом тока с иглообразного электрода. Но, так как теперь поверхность образца и сетка имеет некоторый потенциал, то второй импульс тока будет

слабее первого. Разность между амплитудами первого и второго импульса тока зависит от сопротивления образца и времени между подачей этих импульсов. Остается проградировать аппаратуру и далее можно измерять сопротивления материалов.

Предложенными методами можно измерять влияние радиоактивного излучения на сопротивление образцов или измерять величину радиоактивного излучения (рис. 7). Радиоактивный источник ионизирует воздух между иглообразным электродом и поверхностью образца. Количество ионизированных частиц, созданных в воздухе, пропорционально интенсивности излучения радиоактивного источника. Поэтому можно ожидать, что измеряемое сопротивление материала будет обратно пропорциональным интенсивности излучения радиоактивного источника (рис. 7, кривая 3). Однако при более высоких мощностях излучения источника сопротивление образца оказывается на несколько порядков меньше (рис. 7, кривая 2), чем ожидаемое сопротивление (кривая 3). Это происходит потому, что не только пространство между иглообразным электродом и поверхностью образца влияет на измеряемый импульс тока зарядки образца, но и на поверхности образца скапливаются ионизированные частицы, и, таким образом, уменьшается сопротивление образца. При маленьких интенсивностях радиоактивного излучения частицы с положительным и отрицательным зарядом успевают нейтрализовать друг друга и не оказывают влияния на сопротивление образца. Но с ростом интенсивности радиоактивного

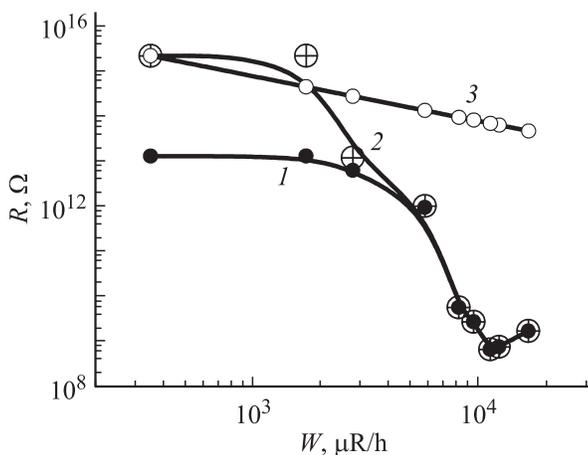


Рис. 7. Зависимость сопротивления лавсана от интенсивности излучения радиоактивного α -источника. 1 — экспериментальная кривая, 2 — из кривой 1 вычтен фоновый сигнал (фон — проводимость образца, когда радиоактивный источник расположен очень далеко), 3 — рассчитанная кривая (предполагается, что сопротивление образца обратно пропорционально числу ионизированных частиц, созданных радиоактивным источником, а число этих частиц пропорционально интенсивности излучения этого источника; первая точка кривой 3 совмещена с первой точкой кривой 2). Мощность радиоактивного источника 43 мR/h. Результаты получены методом, представленным на рис. 2.

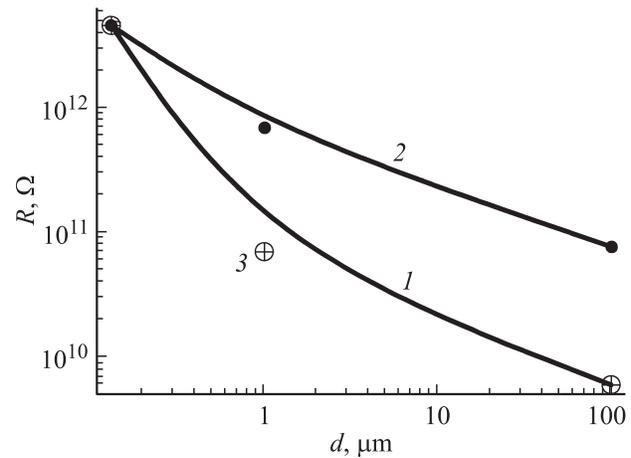


Рис. 8. Зависимость сопротивления слоя аморфного селена от его толщины: 1 — образец освещен белым светом интенсивностью 850 000 lx, 2 — образец в темноте, точка 3 — лавсановая подложка без селена. Селен напылен на лавсановую подложку, толщина которой 50 μm . Измерения проводились представлением на рис. 2 методом.

излучения заряженные частицы разной полярности уже не успевают рекомбинировать и поэтому сопротивление образца уменьшается. По этому явлению можно изучать взаимодействие разнозаряженных частиц на поверхности материалов при различных внешних условиях.

Сопротивление фотопроводящего образца зависит от его освещенности и его толщины (рис. 8). Если освещенность уже известна, то по данным рис. 8 можно установить толщину исследуемого образца (от микронов до миллиметров). При этом исследуемые слои могут быть островковыми — не обязательно сплошными.

Заключение

В данной работе представлены методы, позволяющие измерять сопротивление образцов в пределах 10^7 – 10^{13} Ω — такие значения соответствуют ионизирующим напряжениям. Эти сопротивления могут значительно отличаться от сопротивлений, измеренных стандартными методами (например, с использованием контактов). Поэтому указанное в справочнике большое сопротивление материала еще не дает гарантии, что этот материал будет, например, хорошим изолятором в высоковольтной линии электропередач при высокой влажности или в присутствии радиоактивного излучения.

Предложенные методы измерения сопротивления можно успешно применять также для измерения толщины образцов, относительной влажности окружающей среды, интенсивности радиоактивного излучения или освещенности. По методу, представленному на рис. 2, несложно изготовить портативный карманный измерительный прибор, которым можно было бы измерить один или все выше перечисленные параметры.

Список литературы

- [1] *Kasu M., Kubovic M., Aleksov A., Teofilov N., Taniyasu Y., Sauer R.* // *Diam. Relat. Mater.* 2004. Vol. 13. P. 226–232.
- [2] *Кикоин И.К.* Таблицы физических величин. М.: Атомиздат, 1976. 1009 с.
- [3] *Bowler N.* // *Appl. Phys. D.* 2006. Vol. 39. P. 584–589.
- [4] *Nawawi Z., Sirait K.T., Nagao M.* // *Proc. Int. Conf. Properties and applications of dielectric materials.* China: Xi'an Jiaotong univ, 2000. P. 1073.
- [5] *Tachiki M., Fukuda T., Sugata K., Seo H., Umezawa H., Kawarada H.* // *Appl. Surf. Sci.* 2000. Vol. 159–160. P. 578–582.
- [6] *Лазовский Т., Монтримас Э., Мотеюнас К., Сидаравичюс И., Бразюлис С.* Устройство для определения емкости электрографического слоя. 1989. Б. И. № 22.3. А. с. № 1486954 (СССР).
- [7] *McGaughey O., Ros-Lis J.V., Guckian A., McEvoy A.K., McDonagh C., MacCraith B.D.* // *Anal. Chim. Acta.* 2006. Vol. 570. P. 15–20.
- [8] *Roberto M.* // *Rev. Sci. Instrum.* 2007. Vol. 78. P. 25 103–25 110.
- [9] *Wen-Yuan T.* // *Meas. Sci. Technol.* 2005. Vol. 16. P. 548–555.
- [10] *Agarwala M., Griffithsb R.* // *Anaesthesia & Intensive Care Medicine.* 2006. Vol. 7. P. 95–96.
- [11] *Vautier C., Viger C.* // *J. Non-Cryst. Solids.* 1977. Vol. 23. P. 287–292.