

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-135-144

Измерение электрического потенциала поверхности с использованием статического зонда

Р.И. Воробей, О.К. Гусев, А.Л. Жарин, В.А. Микитевич, К.В. Пантелеев,
А.В. Самарина, А.И. Свистун, А.К. Тявловский, К.Л. Тявловский

Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь

Поступила 03.02.2023

Принята к печати 10.03.2022

Методы контроля изменений электрического потенциала поверхности широко используются в операциях неразрушающего контроля прецизионных поверхностей, например, в электронной промышленности в процессе изготовления полупроводниковых приборов. Целью работы является расширение области применения методик бесконтактного контроля и измерения электрического потенциала поверхности на основе использования статического отсчётного электрода.

Рассмотрены особенности построения и применения устройств измерения электрического потенциала поверхности с использованием неподвижного отсчётного электрода. Несмотря на необходимость увеличения площади зонда по сравнению с устройствами, использующими вибрирующий зонд, методики измерения с неподвижным зондом имеют ряд преимуществ и расширяют область применения измерений электрического потенциала поверхности в контроле изделий с прецизионными поверхностями. Приведены модели формирования измерительного сигнала при наличии пространственной неоднородности электрического потенциала поверхности.

Ключевые слова: электрический потенциал поверхности, поверхностная фото-ЭДС, метод Кельвина, двухконденсаторный метод, статический зонд

Адрес для переписки:

Тявловский К.Л.
Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: ktyavlovsky@bntu.by

Address for correspondence:

Tyavlovsky K.L.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: ktyavlovsky@bntu.by

Для цитирования:

Р.И. Воробей, О.К. Гусев, А.Л. Жарин, В.А. Микитевич,
К.В. Пантелеев, А.В. Самарина, А.И. Свистун,
А.К. Тявловский, К.Л. Тявловский.

Измерение электрического потенциала поверхности
с использованием статического зонда.

Приборы и методы измерений.

2023. – Т. 14, № 2. – С. 135–144.

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-135-144

For citation:

R.I. Vorobey, O.K. Gusev, A.L. Zharin, V.A. Mikitsevich,
K.U. Pantsialeyeu, A.V. Samarina, A.I. Svistun,
A.K. Tyavlovsky, K.L. Tyavlovsky.

[Surface Electric Potential Measurement with a Static Probe].
Devices and Methods of Measurements.

2023, vol. 14, no. 2, pp. 135–144 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-135-144

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-135-144

Surface Electric Potential Measurement with a Static Probe

R.I. Vorobey, O.K. Gusev, A.L. Zharin, V.A. Mikitsevich, K.U. Pantsialeyeu, A.V. Samarina,
A.I. Svistun, A.K. Tyavlovsky, K.L. Tyavlovsky

Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus

Received 03.02.2023

Accepted for publication 10.03.2023

Abstract

Surface electric potential measurements are widely used in non-destructive inspection and testing of precision surfaces, for example, in the production of semiconductor devices and integrated circuits. Features of the construction and application of devices for measuring the surface electric potential using an immovable reference electrode are considered. Despite the need to increase the area of the probe compared to devices with a vibrating probe, measurement techniques with an immovable probe have a number of advantages and could expand the scope of surface electric potential measurements in the inspection of samples with precise surfaces. Models of the formation of a measuring signal in the presence of a spatial inhomogeneity of surface electric potential are presented and discussed.

Keywords: surface electric potential, surface photovoltage, Kelvin probe technique, two-capacitor technique, static probe

Адрес для переписки:

Тявловский К.Л.
Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: ktyavlovsky@bntu.by

Address for correspondence:

Tyavlovsky K.L.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: ktyavlovsky@bntu.by

Для цитирования:

Р.И. Воробей, О.К. Гусев, А.Л. Жарин, В.А. Микитевич,
К.В. Пантелеев, А.В. Самарина, А.И. Свистун,
А.К. Тявловский, К.Л. Тявловский.

Измерение электрического потенциала поверхности
с использованием статического зонда.

Приборы и методы измерений.

2023. – Т. 14, № 2. – С. 135–144.

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-135-144

For citation:

R.I. Vorobey, O.K. Gusev, A.L. Zharin, V.A. Mikitsevich,
K.U. Pantsialeyeu, A.V. Samarina, A.I. Svistun,
A.K. Tyavlovsky, K.L. Tyavlovsky.

[Surface Electric Potential Measurement with a Static Probe].
Devices and Methods of Measurements.

2023, vol. 14, no. 2, pp. 135–144 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-135-144

Введение

Различные методики измерения электрического потенциала поверхности, основанные на методе Кельвина, широко используются при контроле и исследовании различных свойств изделий и материалов с прецизионными поверхностями [1–3]. Новые достижения электроники и техники измерений позволили существенно улучшить метрологические характеристики и область применения метода, чему также способствует неразрушающий характер контроля и высокая чувствительность метода к любым изменениям свойств приповерхностных слоёв, т. к. изменения потенциала поверхности обусловлены изменениями работы выхода электрона, связанными с изменениями химических, физических и структурных свойств приповерхностных слоёв. Чувствительность методов контроля к изменению свойств поверхности весьма высока, так один монослой адсорбированных частиц может вызвать изменение поверхностного потенциала полупроводника на величину порядка 1 В [4], а инструментальная чувствительность методов измерения поверхностного потенциала составляет величину 0,1...1 мВ [5]. Чувствительность метода измерения 1 мВ соответствует возможности обнаружения покрытий поверхности полупроводника, соответствующих одному элементарному заряду на 10^7 поверхностных атомов. Под действием контактной разности потенциалов U_{CPD} между поверхностями отсчётного электрода и объекта контроля происходит разделение заряженных частиц в межэлектродном зазоре и их движение к противоположно заряженным электродам, создавая электрический ток, который может быть измерен измерительным усилителем со сверхвысоким входным сопротивлением.

В современной технике измерений электрического потенциала поверхности существует несколько направлений, с одной стороны:

– применение дополнительных воздействий для выделения информации о физических параметрах приповерхностных слоев [6, с. 17–21], например, времени жизни и поверхностного сопротивления, концентрации железа в кремнии при использовании методики сканирующей

фотостимулированной электрометрии [6, с. 47–51];

– повышение пространственной разрешающей способности, вплоть до размеров на уровне 10 нм [7].

Эти методики в качестве чувствительного элемента используют конструкцию динамического конденсатора, когда в качестве зонда используется вибрирующий электрод малых размеров. С другой стороны, существует ряд применений [8], где требуется получить информацию сразу со всего образца, без необходимости определения локализации каких-либо отклонений контролируемого параметра. Например, при спектроскопических исследованиях поверхности полупроводников. Паразитная модуляция излучения вибрирующим электродом или необходимость помещения вибрирующего узла в вакуум затрудняют применение классической методики Кельвина с вибрирующим конденсатором.

Целью работы являлся анализ особенностей построения измерительных преобразователей бесконтактного контроля электрического потенциала поверхности с использованием структуры чувствительного элемента с неподвижным зондом.

Измерение электрического потенциала поверхности с использованием структуры чувствительного элемента с неподвижным зондом

При использовании в измерительном преобразователе современных операционных усилителей со сверхнизкими входными токами [9] на уровне единиц фемтоампер возможно построение измерителя электрического потенциала поверхности по схеме со статическим электродом [10–13] чувствительного элемента (рисунок 1а) с чувствительностью, сравнимой с методикой вибрирующего электрода. Так как измерения проводятся на постоянном токе, в отличие от схемы с вибрирующим электродом, использующей измерения на переменном токе, то чувствительность этой схемы намного ниже. Для приближения чувствительности метода с неподвижным электродом к чувствительности методик с вибрирующим зондом можно использовать несколько способов. Во-первых, это

конструктивные методы – увеличение площади зонда и уменьшение межэлектродного зазора зонд-исследуемая поверхность, во-вторых, схемотехнические – использование во входном каскаде измерительного преобразователя трансимпедансного усилителя А1 [14] с применением прецизионных операционных усилителей со сверхнизкими входными токами и введение в цепь компенсации источника переменного напряжения с периодом

менее длительности переходных процессов поверхностной фото-ЭДС и амплитудой, превышающей её возможные изменения, что дополнительно с применением интегратора в цепи обратной связи позволяет устранить ошибку гистерезиса передаточной характеристики измерительного преобразователя (рисунок 1b). Измерительные преобразователи формируют компенсирующее напряжение $U_{comp} = -U_{CPD}$.

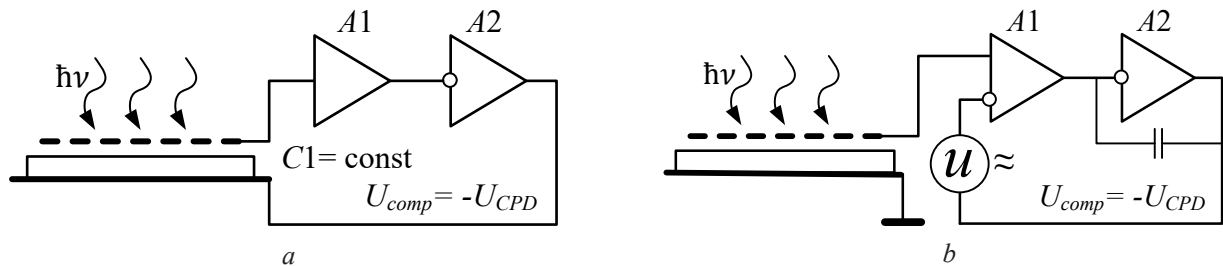


Рисунок 1 – Схема измерения электрического потенциала поверхности со статическим электродом

Figure 1 – Basic diagram of surface electric potential measurements with a static probe

Разновидностью построения схем измерительных преобразователей является двухконденсаторная схема чувствительного элемента, в которой чувствительный элемент образован конденсатором $C1$ неподвижный зонд – поверхность образца, а в измерительную цепь входят также динамический конденсатор $C2$, вынесенный за пределы измерительной ячейки, и входные ёмкость C_{in} и сопротивление R_{in} усилителя измерительного сигнала (рисунок 2). Хотя отсчётным электродом в этой схеме является поверхность конденсатора $C1$, модулятором измерительного сигнала служит динамический конденсатор $C2$, что приводит к снижению чувствительности схемы (1) по сравнению с методиками, где отсчётным электродом непосредственно является одна из обкладок динамического конденсатора.

Двухконденсаторная схема позволяет использовать в качестве динамического конденсатора $C2$ промышленные компоненты, например, динамические конденсаторы типа ЕВП, хорошо защищенные от внешних помех и воздействий. При этом внутри измерительной ячейки может находиться только электрод зонда статического конденсатора $C1$, и дополнительные воздействующие факторы (электрическое поле, агрессивная газовая

среда, вакуум и др.) не будут влиять на другие компоненты измерительной цепи. Недостатком такой схемы измерения является снижение чувствительности с коэффициентом β по сравнению с методом вибрирующего зонда, пропорциональное отношению емкостей C_2 и C_1 :

$$\beta = C_1^2 / (C_1 + C_2)(C_1 + \Delta C_2), \quad (1)$$

где C_1 и C_2 – ёмкости статического и динамического конденсаторов; ΔC_2 – изменение ёмкости динамического конденсатора при вибрации.

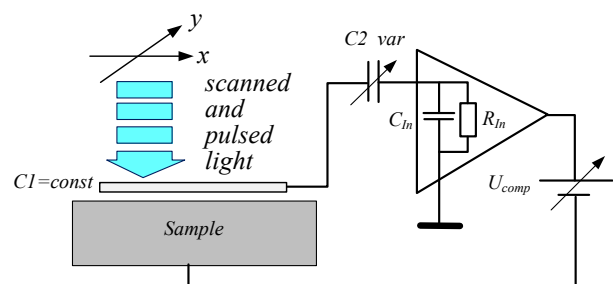


Рисунок 2 – Двухконденсаторная схема измерения электрического потенциала поверхности со статическим электродом

Figure 2 – Basic diagram of surface electric potential measurements with a static probe using a two-capacitor technique

Из (1) следует, что в случае, когда C_1 намного больше C_2 чувствительность практически не уменьшается, т. к. β стремится к 1. Но уже при $C_1 \approx C_2$ чувствительность уменьшается почти в десять раз, что вынуждает либо увеличивать ёмкость C_1 , увеличивая площадь зонда, либо ужесточать требования к чувствительности входного усилителя A_1 .

Измерение электрического потенциала поверхности с пространственной неоднородностью

Бесконтактные измерения электрического потенциала поверхности методом Кельвина и его разновидностями имеют ряд методических особенностей [1, 5, 15], что в свою очередь приводит к необходимости их учёта при контроле свойств материалов и изделий и разработке средств метрологического обеспечения методов неразрушающего контроля. В первую очередь таким фактором, неизбежно сопровождающим любые измерения, является неоднородность свойств поверхностей исследуемого образца [16–19] и отсчётного электрода зонда измерительной ячейки (рисунок 3). Величина поверхностного потенциала связана с работой выхода электрона (РВЭ), зависит от многих факторов, определяемых как внутренней структурой приповерхностных областей объекта контроля, так и адсорбционными процессами на поверхности, и различна на разных участках поверхности. Относительная лёгкость изменения величины поверхностного потенциала [4] и проявление в этих изменениях практически любых физико-химических процессов на поверхности делает необходимым при анализе результатов измерений учёт «биографии» и пространственной однородности исследуемых объектов контроля [13, 15, 18]. Поверхность объектов контроля даже для изделий с прецизионными поверхностями всегда пространственно неоднородна, что неизбежно проявляется и в неоднородном распределении электрического потенциала поверхности. Особенно этот учёт важен при использовании в измерениях зондов большой площади, как в случае измерений потенциала поверхности с неподвижным зондом. Характерными для топологии поверхностного электрического потенциала поверхности (рисунок 3а) являются:

- крупные участки поверхности с отличающимися значениями потенциала (участки A, B, C);
- линейные дефекты D ;
- точечные дефекты E .

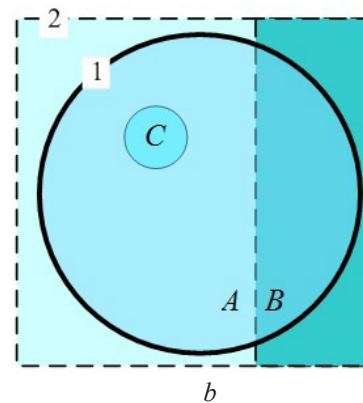
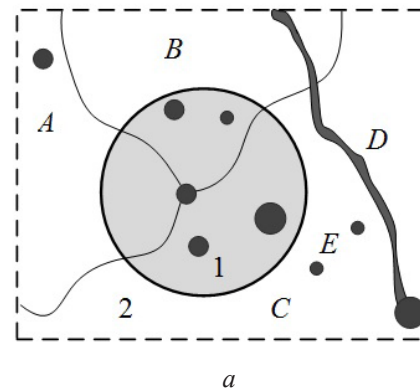


Рисунок 3 – Топология поверхности с дефектами (а) и модель пространственного распределения электрического потенциала поверхности (b)

Figure 3 – Topology of surface containing multiple defects (a) and model of surface electric potential distribution (b)

Необходимо отметить, что численные значения РВЭ для некоторых типов дефектов поверхности могут совпадать, и тогда пространственное распределение потенциала поверхности под зондом 1 исследуемого образца 2 можно представить моделью на рисунке 3b. Соответственно с этой моделью измеряемый электрический потенциал поверхности не будет точно определяться ни одним из значений РВЭ для частных участков $A-C$ в проекции зонда. Модель эффективной работы выхода, по существу, отражает существование значительной гетерогенности свойств поверхности [15].

При этом, наблюдаемые изменения поверхностного потенциала могут быть вызваны не изменением работы выхода электрона на дефектах какого-то определённого типа [4], а изменением соотношения площадей микроучастков поверхности с разным составом дефектов, или адсорбционными явлениями на них.

При неоднородном распределении потенциала поверхности систему отсчётный электрод–исследуемая поверхность можно представить [20] в виде электрически соединённых конденсаторов, каждый со своим средним расстоянием между отсчётным электродом и исследуемой поверхностью, и напряжением между обкладками (рисунок 4).

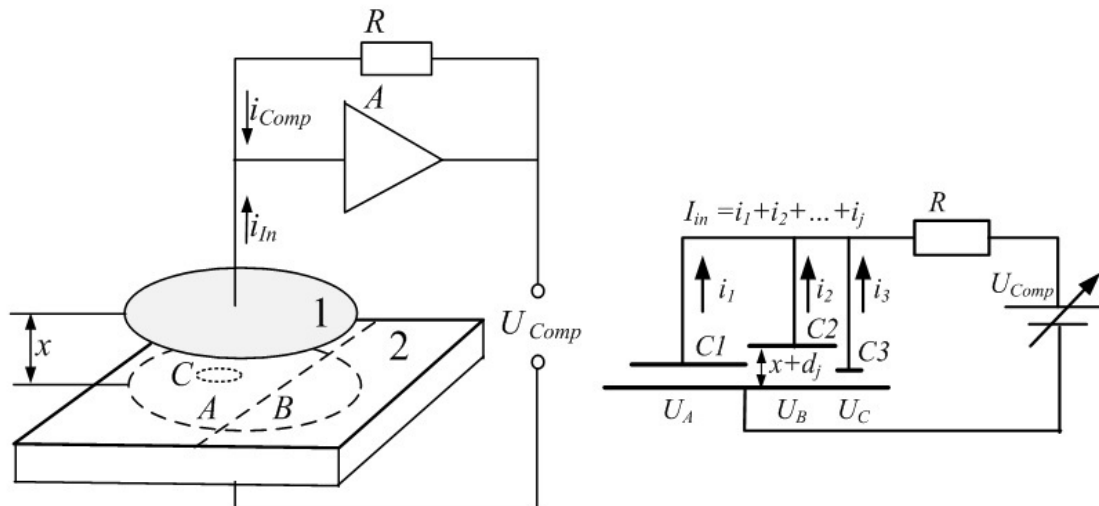


Рисунок 4 – Схема измерения поверхностного потенциала и эквивалентная схема измерительной ячейки в случае неоднородной поверхности

Figure 4 – Basic diagram of surface electric potential measurements and equivalent circuit of a measuring cell for the case of non-homogeneous surface

Если измерительная ячейка образована тремя конденсаторами (рисунок 4), то из условия сохранения заряда Q следует:

$$Q_0 = Q_1 + Q_2 + Q_3 = C_1(U_1 - U_{comp}) + C_2(U_2 - U_{comp}) + C_3(U_3 - U_{comp}), \quad (2)$$

где Q_1, Q_2, Q_3 – заряд на участках поверхности A, B, C , в проекции электрода 1; C_1, C_2, C_3 – ёмкости конденсаторов электрод 1 – участки поверхности A, B, C ; U_1, U_2, U_3 – потенциалы поверхности под участками поверхности A, B, C в проекции электрода 1, соответственно.

Математическое моделирование в среде *MathCAD* соотношения (2) относительно измеряемого значения компенсирующего напряжения U_{comp} показывает, что аналитическое выражение для U_{comp} уже при числе микроучастков неоднородности более двух становится чрезвычайно громоздким [20, 21]. Однако графический вид зависимости U_{comp} от межэлектродного зазора слабо зависит от числа микроучастков, и в большей степени определяется соотношением площадей микро-

участков (моделируется соотношением ёмкостей $C_i - C_j$) с различными потенциалами поверхности. Типичная зависимость компенсирующего напряжения от межэлектродного зазора приведена на рисунке 5. При увеличении межэлектродного зазора величина измеряемого компенсирующего напряжения стремится к среднему значению потенциала поверхности в проекции отсчётного электрода. При однородной поверхности под отсчётным электродом дистанционная зависимость компенсирующего напряжения отсутствует.

Из результатов моделирования величины измеряемого значения компенсирующего напряжения в случае неоднородной поверхности образца следует, что измеряемое значение поверхностного потенциала будет всегда занижено по отношению к среднему значению потенциала под электродом. При этом, дистанционная зависимость компенсирующего напряжения позволяет определять статистические параметры пространственного распределения поверхностного потенциала (среднее

значение и среднеквадратическое отклонение) даже при размерах микронеоднородностей существенно меньших размеров отсчётного электрода. При наличии пространственной неоднородности электрического потенциала поверхности следует учитывать следующие факторы:

– при наличии под зондом Кельвина нескольких (более двух) кластеров наблюдается зависимость U_{CPD} от расстояния между образцом и отсчётным электродом;

– удельный вес P_i кластеров в формировании среднего значения работы выхода больше для кластеров с меньшим значением работы выхода.

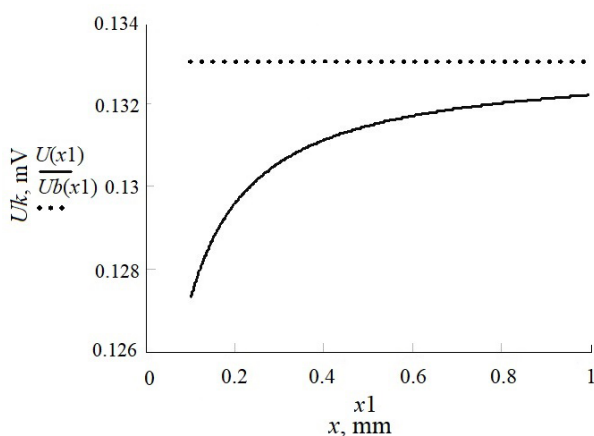


Рисунок 5 – Результаты моделирования компенсирующего напряжения от межэлектродного зазора при неоднородной поверхности

Figure 5 – The model plot of compensation voltage vs probe-to-sample gap for non-homogeneous surface case

Эти факторы часто определяют неоднозначность соответствия среднего для объекта контроля значения U_{CPD} типу и качеству обработки поверхности при сравнении образцов с разной степенью неоднородности свойств поверхности [6, 16, 20].

Метрологическая модель измерений электрического потенциала поверхности

Метрологическая модель [21] измерений электрического потенциала поверхности и параметров однородности его пространственного распределения выражается объединением нескольких частных погрешностей: геометрической погрешности формы и расположения каждого исследуемого микроучастка

Δx_i , погрешности расстояния между зондом и поверхностью Δd_i , неопределённости значения электрического потенциала в пределах контролируемой области ΔU_0 :

$$\Delta U_{CPD}(x) = \left(\sum_j (\Delta x_j * \Delta d_j) \right) \Delta U_0. \quad (3)$$

Если в методике измерения поверхностного потенциала использовать дистанционную зависимость измеряемого значения потенциала (рисунок 5) как дополнительный независимый канал измерительной информации, то анализ параметров этой зависимости (2) позволяет осуществлять неразрушающий контроль параметров пространственного распределения дефектов с характерными размерами много меньшими размеров отсчётного электрода [20]. При этом обнаружительная способность метода ограничивается только длиной экранирования электрического поля в области дефектов [4] и может составлять величины десятки-сотни нанометров при размерах отсчётного электрода более 1 мм [15, 20]. Но определить локализацию дефектов внутри проекции отсчётного электрода при этом невозможно. Для ряда операций контроля изделий с прецизионными поверхностями это несущественно, но приводит к затруднениям при проведении процедур калибровки и эталонирования измерительных установок. В [21] для проведения процедуры эталонирования поверки предлагается использовать тестовую структуру, поверхность которой образована совокупностью проводящих участков, разбитых на группы, каждая из которых подключается к первичному источнику эталонного потенциала. Размеры тестовой структуры должны превышать размеры проекции отсчётного электрода измерительной системы не менее чем на величину межэлектродного зазора. Параметры пространственного распределения потенциала поверхности эталона задаются коммутацией матрицы тестовых электродов к матрице источника эталонного потенциала [21]. Это позволяет формировать определённый тип пространственного распределения, задаваемый конфигурацией матрицы ключей, что соответственно приводит к тому или иному типу (2) зависимости измерительного сигнала от межэлектродного зазора системы отсчётный электрод–тестовая структура (рисунок 5).

Метрологическая модель системы отсчётный электрод измерительной установки – тестовая структура ΔU_{TC} может быть выражена объединением погрешности эталонного источника $\Delta U_{iЭт}$, погрешности тестовой структуры ΔU_{iTC} , определяемой неоднородностью распределения потенциала поверхности тестового электрода $U_{i\sigma}$, а также геометрической погрешности расстояния между электродом и тестовой структурой, выраженной через погрешность эквивалентной электрической ёмкости ячейки тестовой структуры ΔC_i :

$$\Delta U_{TC} = \Delta U_{iЭт} \times \Delta U_{iTC} \times \Delta C_i. \quad (4)$$

При разработке конструкции и изготовлении матрицы эталонированных электродов необходимо принять меры по уменьшению влияния технологического разброса значений поверхностного потенциала самих эталонных электродов.

Заключение

Методика измерения электрического потенциала поверхности с использованием статического отсчётного электрода обеспечивает возможность использования простой конструкции чувствительного элемента без применения подвижных элементов, что позволяет помещать измерительную ячейку внутрь газовых и вакуумных систем, включать их в состав оптических схем без влияния на измерительный сигнал паразитной модуляции.

Применение неподвижного электрода по сравнению с методиками, где отсчётный электрод входит в состав вибрирующего конденсатора, обеспечивает расширение области применения методик измерения электрического потенциала поверхности, например, в область спектроскопических исследований свойств поверхности. Устранение ряда методических ограничений сопровождается снижением абсолютной чувствительности, что вынуждает использовать во входных электронных узлах измерительных преобразователей операционных усилителей со сверхмалыми входными токами (менее 10 фА).

Приведено сравнение и особенности применения методик измерения электрического потенциала поверхности с использованием

неподвижного отсчётного электрода в схеме статического конденсатора и двухконденсаторной схеме измерительной ячейки.

Рассмотрено влияние неоднородности свойств поверхности на формирование измерительного сигнала. Показано, что обнаружительная способность метода к неоднородности свойств поверхности при наличии дефектов ограничивается только длиной экранирования электрического поля в области дефектов и может составлять величину десятки-сотни нанометров при размерах отсчётного электрода более 1 мм [2, 4]. Однако, определение локализации дефектов внутри проекции отсчётного электрода при этом невозможно.

Приведены особенности составляющих погрешности в метрологической модели формирования измерительного сигнала в методике измерения электрического потенциала поверхности с использованием статического отсчётного электрода.

Список использованных источников

1. *Kronik L.* Surface photovoltage phenomena: theory, experiment, and applications / Leor Kronik, Yo-ram Shapira // *Surface Science Reports*, 1999, vol. 37, iss. 1–5, pp. 1–206. DOI: 10.1016/S0167-5729(99)00002-3
2. *Noras A.* Non-contact surface charge/voltage measurements. Capacitive probe-principle of operation / A. Noras // *Trek*. – 2002. – № 3001. – Pp. 1–8.
3. *Жарин А.Л.* Метод контактной разности потенциалов и его применение в трибологии. – Мн.: Бестпринт, 1996. – 240 с. DOI: 10.13140/RG.2.1.3993.8645
4. *Моррисон С.* Химическая физика поверхности твердого тела. – М.: Мир, 1980. – 488 с.
5. *Пантелеев К.В.* Построение измерителей контактной разности потенциалов / К.В. Пантелеев, В.А. Микитевич, А.Л. Жарин // *Приборы и методы измерений*. – 2016. – Т. 7. – № 1. – С. 7–15. DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-7-15
6. *Zharin Anatoly.* Determining the lifetime of minority charge carriers and iron impurity concentration in semiconductor structures with submicron layers / A. Zharin [et al.] // *Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 2. – Iss. 4, Article 3. – Pp. 17–21.
7. *Поляков В.В.* Контактная сканирующая емкостная микроскопия большемерных образцов / В.В. Поляков // *Научное приборостроение*. – 2009. – Т. 19. – № 3. – С. 62–66.

8. Kronik L. Surface Photovoltage Spectroscopy of Semiconductors / L. Kronik, Y. Shapira // *Encyclopedia of Modern Optics*. – 2005. – Pp. 36–43.

DOI: 10.1016/B0-12-369395-0/00631-X

9. Штрапенин Г. Современные операционные усилители фирмы National Semiconductor / Г. Штрапенин // *Компоненты и технологии*. – 2005. – № 7. – С. 46–51.

10. Крейг А. Исследование зависимости КРП металлов от механического напряжения методом Кельвина / А. Крейг, Е. Радека // *Приборы для научных исследований*. – 1970. – № 2. – С. 99–105.

11. Delchar T. A static capacitor method for the measurement of surface potential of gases on evaporated metal films / T. Delchar, A. Eberhagen, F.C. Tompkins // *J. of Scientific Instr.* – 1963. – Vol. 40. – № 3. – Pp. 105–109.

DOI: 10.1088/0950-7671/40/3/308

12. Jacobs J.C. Surface potential measurements of insoluble monolayers using the static-capacitor method / J.C. Jacobs [et al.] // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 1981. – Vol. 84. – Pp. 270–271.

DOI: 10.1016/0021-9797(81)90285-X

13. Mizse J. Surface potential mapping: comparison of the vibrating capacitor and the SPV method / Janos Mizse // *Solid-State Electronics*. – 2000. – Vol. 44. – Iss. 1. – Pp. 509–513.

DOI: 10.1016/S0038-1101(99)00264-6

14. Ferrari G. Transimpedance amplifier for high sensitivity current measurements on nanodevices / G. Ferrari [et al.] // *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. – 2009. – Vol. 44. – No. 5. – Pp. 1609–1616.

DOI: 10.1109/JSSC.2009.2016998

15. Woodall I.M. Summary Abstract: Are they really Schottky barriers after all? / I.M. Woodall, I.L. Frecoff // *J. Vac. Sci. Technol.* – 1982. – Vol. 21. – № 2. – Pp. 574–576. DOI: 10.1116/1.571766

16. Baytekin H.T. The Mosaic of Surface Charge in Contact Electrification / H.T. Baytekin [et al.] // *Science*. – 2011. – Vol. 333. – Iss. 6040. – Pp. 308–312.

DOI: 10.1126/science.1201512

17. Yamasue Kohei. Surface Potential Fluctuations of SiO₂/SiC Interfaces Investigated by Local Capacitance-Voltage Profiling Based on Time-Resolved Scanning Nonlinear Dielectric Microscopy / Kohei Yamasue, Cho Yasuo // *Materials Science Forum. Silicon Carbide and Related Materials*. – 2021. – Vol. 1062. – Pp. 335–340. DOI: 10.4028/p-2t7zak

18. Glatzel Th. Kelvin probe force microscopy on III-V semiconductors: the effect of surface defects on the local work function / Th. Glatzel [et al.] // *Materials Science and Engineering*. – 2003. – Vol. 102. – Iss. 1–3. – Pp. 138–142.

DOI: 10.1016/S0921-5107(03)00020-5

19. Торхов Н.А. Фрактальная геометрия поверхностного потенциала электрохимически осажденных пленок платины и палладия / Н.А. Торхов, В.А. Новиков // *Физика и техника полупроводников*. – 2009. – Т. 43, вып. 8. – С. 1109–1116.

20. Тявловский К.Л. Многопараметрические измерения электрического потенциала поверхности с использованием адаптивной односигнальной модели / К.Л. Тявловский [и др.] // *Метрология и приборостроение*. – 2008. – № 2. – С. 27–32.

21. Тявловский К.Л. Метрологическое обеспечение бесконтактных измерений параметров микронеоднородного распределения электрического потенциала поверхности / К.Л. Тявловский [и др.] // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. – 2009. – № 4. – С. 34–37.

References

1. Kronik L., Shapira Y. Surface photovoltage phenomena: theory, experiment, and applications. *Surface Science Reports*, 1999, vol. 37, iss. 1–5, pp. 1–206.

DOI: 10.1016/S0167-5729(99)00002-3

2. Noras A. Non-contact surface charge/voltage measurements. Capacitive probe-principle of operation. *Trek*, 2002, no. 3001, pp. 1–8.

3. Zharin A. Method of contact potential difference and its application in tribology. Minsk: Bestprint Publ., 1996, 240 p.

DOI: 10.13140/RG.2.1.3993.8645

4. Morrison S. Chemical physics of solid state surface. Moscow: Mir Publ., 1980, 488 p.

5. Pantsialeyeu K.U., Mikitsevich U.A., Zharin A.L. Design of the contact potentials difference probes. *Devices and Methods of Measurements*, 2016, vol. 7, no. 1, pp. 7–15 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-7-15

6. Zharin Anatoly, Pantsialeyeu K., Svistun A., Tyavlovsky K. Determining the lifetime of minority charge carriers and iron impurity concentration in semiconductor structures with submicron layers. *Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering*, 2020, vol. 2, iss. 4, Article 3, pp. 17–21.

7. Polyakov V.V. *Kontaknaya skaniruyushchaya emkostnaya mikroskopiya bolsherazmernih obrazcov* [Application of Scanning Capacitance Microscopy to Large-Scale Samples]. *Nauchnoe priborostroenie* [Scientific Instrumentation Engineering], 2009, vol. 19, no. 3, pp. 62–66 (in Russian).

8. Kronik L., Shapira Y. Surface Photovoltage Spectroscopy of Semiconductors. *Encyclopedia of Modern Optics*, 2005, pp. 36–43.

DOI: 10.1016/B0-12-369395-0/00631-X

9. SHtrapein G. *Sovremennye operacionnye usiliteli firmy National Semiconductor* [Modern operational amplifiers by National Semiconductor]. *Komponenty i tekhnologii* [Components and technologies], 2005, no. 7, pp. 46–51 (in Russian).
10. Craig A., Radeka E. *Issledovanie zavisimosti KRP metallov ot mehanicheskogo napryazhenija metodom Kelvina* [Study of CPD vs mechanical tension dependence of metals by Kelvin probe technique]. *Pribory dlya nauchnyh issledovaniy* [Instrumentation for Scientific Research], 1970, no. 2, pp. 99–105 (in Russian).
11. Delchar T., Eberhagen A., Tompkins F.C. A static capacitor method for the measurement of surface potential of gases on evaporated metal films. *J. of Scientific Instr.*, 1963, vol. 40, no. 3, pp. 105–109.
DOI: 10.1088/0950-7671/40/3/308
12. Jacobs J.C., Buuron A.J.M., Renders P.J.M., Snik A.F.M. Surface potential measurements of insoluble monolayers using the static-capacitor method. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1981, vol. 84, pp. 270–271.
DOI: 10.1016/0021-9797(81)90285-X
13. Mizse J. Surface potential mapping: comparison of the vibrating capacitor and the SPV method. *Solid-State Electronics*, 2000, vol. 44, iss. 1, pp. 509–513.
DOI: 10.1016/S0038-1101(99)00264-6
14. Ferrari G., Gozzini F., Molari A., Sampietro M. Transimpedance amplifier for high sensitivity current measurements on nanodevices. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2009, vol. 44, no. 5, pp. 1609–1616.
DOI: 10.1109/JSSC.2009.2016998
15. Woodall I.M., Frecof I.L. Summary Abstract: Are they really Schottky barriers after all? *J. Vac. Sci. Technol.*, 1982, vol. 21, no. 2, pp. 574–576.
DOI: 10.1116/1.571766
16. Baytekin H.T., Patashinski A.Z., Branicki M., Baytekin B., Soh S., Grzybowski B.A. The Mosaic of Surface Charge in Contact Electrification. *Science*, 2011, vol. 333, iss. 6040, pp. 308–312.
DOI: 10.1126/science.1201512
17. Yamasue Kohei, Yasuo Cho. Surface Potential Fluctuations of SiO₂/SiC Interfaces Investigated by Local Capacitance-Voltage Profiling Based on Time-Resolved Scanning Nonlinear Dielectric Microscop. *Materials Science Forum. Silicon Carbide and Related Materials*, 2021, vol. 1062, pp. 335–340. **DOI:** 10.4028/p-2t7zak
18. Glatzel Th. Kelvin probe force microscopy on III-V semiconductors: the effect of surface defects on the local work function. *Materials Science and Engineering*, 2003, vol. 102, iss. 1–3, pp. 138–142.
DOI: 10.1016/S0921-5107(03)00020-5
19. Torkhov N.A., Novikov V.A. *Fraktalnaya geometriya poverhnostnogo potenciala electrohimicheski osazhdennykh ple-nok platiny i palladiya* [Fractal geometry of surface potential of electrochemically deposited platinum and palladium films]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Physics and technology of semiconductors], 2009, vol. 43, iss. 8, pp. 1109–1116 (in Russian).
20. Tyavlovsky K.L., Tyavlovsky A.K., Vorobei R.I., Gusev O.K., Svistun A.I., Ananchikov I.A. *Mnogo-parametricheskie izmereniya elektricheskogo potenciala poverhnosti s ispol'zovaniem adaptivnoy odnosignal'noy modeli* [Multi-parameter measurements of surface electrical potential with the use of adaptive one-signal model]. *Metrologiya i priborostroeniye* [Metrology and Instrumentation], 2008, no. 2, pp. 27–32 (in Russian).
21. Tyavlovsky K.L., Gusev O.K., Vorobei R.I. *Metrologicheskoe obespechenie beskontaktnykh izmereniy parametrov mikroneodnorodnogo raspredeleniya elektricheskogo potenciala poverhnosti* [Metrological assurance of measurements of micro-nonhomogeneous distribution of surface electrical potential]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, control', diagnostika* [Devices and Systems. Control, Monitoring, Diagnostics], 2009, no. 4, pp. 34–37 (in Russian).