

О. К. Гусев,
 К. Л. Тявловский,
 А. К. Тявловский,
 Р. И. Воробей,
 А. И. Свистун,
 И. А. Ананчиков

МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ПОВЕРХНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДАПТИВНОЙ ОДНОСИГНАЛЬНОЙ МОДЕЛИ

УДК 537.58

Рассмотрены вопросы реализации многопараметрических измерений характеристик пространственного распределения электрического потенциала поверхности проводящих объектов с применением адаптивной односигнальной модели. Показана возможность использования одного измерительного канала для одновременного измерения нескольких параметров пространственного распределения электрического потенциала поверхности. Использование физико-математических моделей в полунатурной схеме измерительной установки позволяет гибко изменять тип и диапазон вводимых измерительных воздействий в зависимости от поставленной измерительной задачи.

The article reviews the issues of realization of multi-parameter measurements for characteristics of spatial distribution of conductive objects surface electrical potential with the use of adaptive one-signal model. Authors show the possibility to use one measuring channel for simultaneous measurement of multiple parameters of spatial distribution of conductive objects surface electrical potential. The use of physical-mathematical models in scaled-down schema of measuring installation ensures flexibility in changing the type and range of measuring impacts depending on specified measuring task.

Большинство измерительных сигналов несет информацию не только об измеряемых параметрах объекта контроля, но также содержит ряд неинформативных для данной измерительной задачи параметров, несущих информацию о других параметрах, характеризующих объект контроля, причем эта дополнительная информация не может быть выделена из сигнала при использовании традиционных методик измерения. Использование в традиционных методах многопараметрических сигналов затрудняет интерпретацию результатов измерения и увеличивает их погрешность. С другой стороны, применение таких сигналов позволяет определять комплекс свойств контролируемых объектов посредством ограниченного набора средств и методик. Если в стандартных многоканальных методах многопараметрических измерений каждой измеряемой величине соответствует отдельный измерительный канал [1], то в многопараметрических измерениях [2 – 4] количество измерительных каналов может быть снижено вплоть до одного.

В частности, при неразрушающем контроле параметров изделий из проводящих материалов (металлы, полупроводники, композитные материалы, пленочные структуры) измерительная задача заключается в измерении двумерного распределения параметров структурных дефектов в условиях неоднородного пространственного распределения и присутствия в одном объекте контроля нескольких типов дефектов, характеризующихся

разными значениями формируемого электрического потенциала. Метод измерения поверхностного потенциала с использованием вибрирующего отсчетного электрода (зонда Кельвина) является неразрушающим экспрессным методом контроля характеристик поверхности и приповерхностных слоев твердых тел [5]. Однако его применение сдерживается трудностью интерпретации результатов, связанной с отсутствием однозначной связи выходного сигнала чувствительного элемента с отдельными физическими параметрами поверхности и рядом методических и физических ограничений, снижающих точность измерений или даже качественно искажающих результат.

Одним из основных факторов, снижающих точность измерений, является пространственная неоднородность поверхностного потенциала, вызванная, например, наличием механических напряжений в приповерхностном слое [5 – 7]. Поэтому актуальной является задача разработки метода измерения, учитывающего влияние неоднородного распределения физических свойств поверхности в пределах проекции отсчетного электрода на исследуемую поверхность объекта измерения. При использовании традиционных методик [5 – 8] информация о значениях параметров пространственного распределения электрического потенциала поверхности, соответствующих каждому элементу двумерного пространства под отсчетным электродом, должна поступать на чувствительный элемент первичного преобразователя одновре-

менно, а, следовательно, сам первичный преобразователь должен быть матричным, с размерами элементов матрицы чувствительного элемента, сравнимыми с характерными размерами микронеоднородностей исследуемой поверхности. Необходимо учитывать, что физический принцип получения измерительного сигнала ограничивает минимальные размеры отсчетного электрода. Это исключает возможность применения стандартных методов измерений параметров пространственного распределения электрического потенциала поверхности в случае размеров микронеоднородности поверхности существенно меньших размеров отсчетного электрода чувствительного элемента первичного преобразователя.

Решение указанной измерительной задачи в соответствии с методом многопараметрических измерений [3, 4] требует реализации новой методики измерений параметров пространственного распределения электрического потенциала поверхности со следующими основными исходными ограничениями:

1. Чувствительный элемент первичного измерительного преобразователя должен быть одноэлементным.
2. Отсутствие матричного чувствительного элемента измерительного преобразователя, т.е. многокомпонентный по соотношению площадей микроучастков поверхности и их электрических потенциалов объект измерения должен взаимодействовать непосредственно с одноэлементным первичным преобразователем.
3. Ограничение или исключение процедур двухкоординатного сканирования положения отсчетного электрода.
4. Чувствительный элемент первичного измерительного преобразователя должен обеспечивать формирование измерительного сигнала, позволяющего определить как среднее значение измеряемого потенциала, так и среднеквадратическое значение измеряемого потенциала микроучастков под отсчетным электродом при условии, что размеры каждого микроучастка много меньше размеров отсчетного электрода измерительного преобразователя, то есть измерения должны быть многопараметрическими.

Реализация указанной методики измерений в рамках разработанной ранее концепции односигнальных адаптивных методов измерений параметров объектов в неопределенных состояниях [3] предполагает формирование некоторого многопараметрического измерительного сигнала и последовательное определение значений измеряемых величин, выступающих в качестве параметров этого сигнала. При этом источником текущей измерительной информации для адаптации выступает сам многопараметрический измерительный сигнал.

Разработанная в рамках модели многопараметрических измерений методика измерения интегральных параметров пространственного распределения поверхностного потенциала иллюстрируется рис. 1. На рис. 1 показана структура взаимодействия объекта, характеризуемого несколькими информативными измеряемыми параметрами, и средства измерений при базовом измерительном преобразовании "измеряемые величины x_i – входной измерительный сигнал X первичного преобразователя – выходной измерительный сигнал Y первичного преобразователя", осуществляемом при измерительных воздействиях α_q .

Объект контроля характеризуется p -независимыми информативными параметрами. Значение некоторой измеряемой величины x_i определяется значениями других параметров объекта измерений и влияющих величин ξ_k , в соответствии с математической моделью объекта измерений

$$x_i = f_i^0(x_1, x_2, \dots, x_p, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k). \quad (1)$$

Взаимодействие объекта и чувствительного элемента средства измерений характеризуется тем, что на вход первичного преобразователя средства измерений воздействует сигнал X

$$X = F_0[x_1, x_2, \dots, x_p, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k], \quad (2)$$

где F_0 – некоторый функционал, описывающий ряд определенных математических операций, производимых над измеряемыми величинами x_i .

Выходной сигнал Y , формируемый в результате базового измерительного преобразования F сигнала X , содержит информацию об измеряемых физических величинах

$$Y = FF_0[x_1, x_2, \dots, x_p, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k]. \quad (3)$$

Для обеспечения возможности измерений некоторой величины x_i необходимо подвергнуть базовый измерительный сигнал преобразованию Φ_i , которое должно удовлетворять условию

$$\begin{aligned} Y_i &= \Phi_i FF_0[x_1, x_2, \dots, x_p, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k] = \\ &= \varphi[\varphi_i(x_i) + \varphi_p(x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_p)] \rightarrow \\ &\rightarrow \varphi[\varphi_i(x_i)] = \Phi_i^i[x_i]. \end{aligned} \quad (4)$$

Для его выполнения необходимо, чтобы математическая модель базового измерительного сигнала допускала аддитивное разделение рассматриваемой величины относительно других измеряемых величин.

Частным случаем выполнения условия (4) является полное разделение измеряемых физических величин в математической модели базового измерительного сигнала:

$$Y_i = \Phi_i F F_0 [x_1, x_2, \dots, x_p, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k] = \Phi \left[\sum_i \varphi_i(x_i) \right] \rightarrow \Phi [\varphi_i(x_i)] = \Phi'_i [x_i]. \quad (5)$$

Любую из измеряемых физических величин можно рассматривать как параметр состояния объекта измерений S . Общим условием выполнения требования (4) является равенство нулю смешанных частных производных измерительного сигнала, возникающего в результате взаимодействия объекта и чувствительного элемента первичного измерительного преобразователя взаимодействия, по измеряемым параметрам:

$$\frac{\partial^2 Y_i}{\partial x_j \partial x_k} = 0; \frac{\partial^2 Y_i}{\partial x_i \partial x_2} = 0; \dots; \frac{\partial^2 Y_i}{\partial x_i \partial x_{i-1}} = 0; \frac{\partial^2 Y_i}{\partial x_i \partial x_{i+1}} = 0; \dots; \frac{\partial^2 Y_i}{\partial x_i \partial x_p} = 0. \quad (6)$$

Отметим, что при математическом моделировании измерительный сигнал Y_i в ряде случаев может быть приведен к виду, удовлетворяющему указанным критериям, несколькими возможными вариантами сочетаний преобразований F_0, F'_i, Φ_i . Некоторые из этих вариантов могут допускать натурную реализацию в физической модели первичного измерительного преобразователя [7, 9]. Соответственно для реализации многопараметрических измерений с использованием одноэлементного преобразователя могут быть использованы не один, а несколько возможных принципов измерений.

Выбор того или иного принципа функционирования первичного измерительного преобразователя в таком случае должен осуществляться на основе использования критериев качества измерений, включая критерии адекватности, экономичности, стандартизованности и эргономичности. Применительно к измерениям электрического потенциала поверхности методом зонда Кельвина функционирование первичного измерительного преобразователя может быть модифицировано введением

таких дополнительных измерительных воздействий α как: введение освещения или изменение условий освещения [9] подэлектродной области, изменение среднего значения межэлектродного зазора [10], введение дополнительных модулирующих источников напряжения в цепь автокомпенсации и т.д. На практике целесообразно в начале осуществления стадии постановки измерительной задачи выбрать исходный физический принцип действия первичного измерительного преобразователя, который по результатам осуществления всего алгоритма измерений может быть изменен.

В соответствии с предложенным алгоритмом измерительной процедуры [3, 10] в качестве исходного базового принципа измерений поверхностного электрического потенциала использован наблюдаемый экспериментально [7, 10] физический эффект зависимости измеряемого компенсирующего напряжения от межэлектродного зазора чувствительного элемента. Математическое моделирование [10] функциональных зависимостей измеряемого компенсирующего напряжения при использовании методики зонда Кельвина показало, что при наличии микронеоднородности поверхности в проекции отсчетного электрода (участки А-D на рис. 2,а) наблюдается зависимость измеряемого потенциала от расстояния d между отсчетным электродом и поверхностью (рис. 2,б). Отметим, что существующие методики не позволяют однозначно интерпретировать результаты измерений, если в проекции отсчетного электрода на исследуемой поверхности находится несколько участков поверхности с различающимися значениями потенциала [11].

При увеличении расстояния между отсчетным электродом и исследуемой поверхностью измеряемое значение стремится к среднему значению потенциалов микроучастков поверхности ($U_1 \dots U_N$). Изменение измеряемого компенсирующего напряжения при увеличении расстояния d от

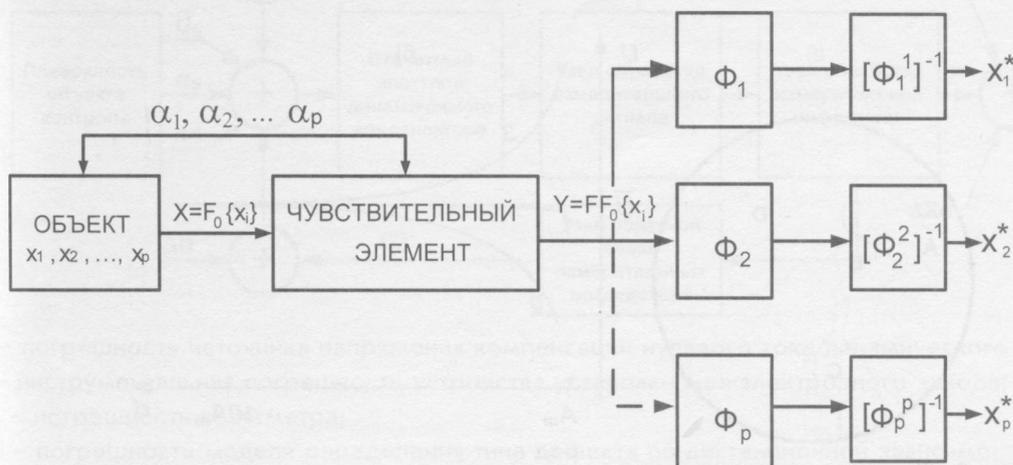


Рис. 1. Структура взаимодействия объекта и средства измерения

значения амплитуды колебаний A_m (рис. 2,б) до величины около $10 \cdot A_m$ соответствует среднеквадратическому отклонению от среднего значения измеряемого потенциала. Для однородной поверхности (под отсчетным электродом располагается только один участок) измеряемый потенциал при изменении межэлектродного зазора не изменяется – линия 1 на рис.2,б. Для неоднородной поверхности (под отсчетным электродом располагается несколько участков с различающимися потенциалами) наблюдается дистанционная зависимость компенсирующего напряжения – линии 2 и 3. Соотношение размеров микроучастков поверхности и значений потенциалов на каждом из микроучастков определяет тип зависимости – 2 или 3 – и крутизну дистанционной зависимости [12]. Таким образом, изменяя расстояние между отсчетным электродом и исследуемой поверхностью, можно определить как среднее значение, так и среднеквадратическое отклонение поверхностного потенциала, причем размеры участков микронеоднородности могут быть намного меньше размеров отсчетного электрода, вплоть до размеров, определяемых длиной электрического экранирования поля локальных дефектов поверхности. Для большинства типов контролируемых объектов минимальные размеры обнаруживаемых микродефектов составляют 20...100 нм.

В соответствии с разработанным алгоритмом, не нарушая выбранного исходного базового принципа измерений, нами введено конструктивное изменение в первичный измерительный преобразователь (α_d , рис.1) путем использования перемещения отсчетного электрода в направлении, перпендикулярном исследуемой поверхности. При этом отличительными признаками методики измерения являются:

1. Значение измеряемого компенсирующего напряжения, соответствующее удалению отсчетного электрода от исследуемой поверхности на рассто-

яние $10 \cdot A_m$, определяет среднее значение потенциалов микроучастков поверхности;

2. Разность измеряемых значений компенсирующего напряжения при изменении межэлектродного зазора от A_m до $10 \cdot A_m$ соответствует величине среднеквадратического отклонения от среднего значения измеряемого потенциала;

3. Знак изменения измеряемого компенсирующего напряжения при изменении межэлектродного зазора от A_m до $10 \cdot A_m$ определяет, являются ли отклонения на выбросах потенциала (микродефектах) большими среднего значения, или меньшими;

4. Крутизна наблюдаемой дистанционной зависимости определяет тип пространственного распределения электрического потенциала на микроучастках и, соответственно, тип пространственного распределения структурных дефектов.

Для дополнительного расширения возможностей методики может быть введено дополнительное измерительное воздействие α в виде подсветки участка поверхности объекта контроля светом из области длин волн собственного поглощения приповерхностной области объекта контроля. Необходимо отметить, что измерения поверхностного потенциала с использованием метода зонда Кельвина являются неразрушающими, позволяют контролировать состояние объектов измерения, покрытых диэлектрическими слоями, например, защитным лаком, слоем оксида, смазкой и т.д.

На рис. 3 представлена модель составляющих погрешности измерений параметров пространственного распределения характеристик поверхности в рамках модели многопараметрической измерений с использованием адаптивной одноосевой модели. На рис. 3 представлены основные этапы преобразования измерительного сигнала и соответствующие им составляющие погрешности преобразования. Символами * обозначены измеренные значения соответствующих измеряемых параметров объекта контроля.

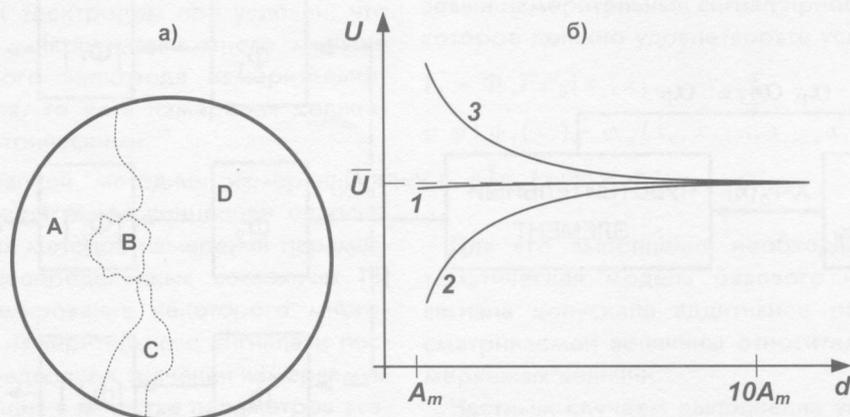


Рис. 2. Пространственное распределение электрического потенциала поверхности под отсчетным электродом (а) и зависимость измеряемого значения потенциала от межэлектродного зазора чувствительного элемента (б)

Необходимо отметить, что предложенная методика измерений реализует полунатурную схему диагностики состояния объекта (рис. 4). При полунатурном моделировании [13] связь параметров модели через измерительные воздействия с внешними элементами обеспечивается сопрягающими устройствами ввода-вывода (приборным интерфейсом) и исполнительными подсистемами. При этом модель поведения объекта представлена физико-математической моделью [10, 12], реализуемой через устройства сопряжения как объект пакета прикладных программ персональной ЭВМ. При диагностировании объекта контроля производится сравнение реакции объекта контроля на дополнительные измерительные воздействия – изменение межэлектродного зазора и освещение – с реакцией физико-математической модели и фиксируются значения параметров модели, для которых реализуется минимальное значение сигнала ошибки.

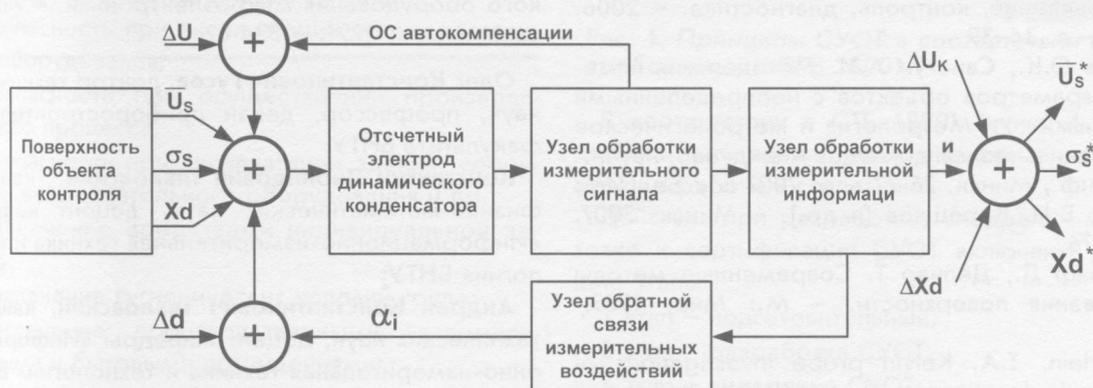
Возможность измерения нескольких параметров пространственного распределения электрического потенциала поверхности с использованием одного измерительного канала подтверждена экспериментально [10, 12]. При этом наиболее существенным отличием от стандартных методик является возможность обнаружения микродефектов в приповерхностной области объекта контроля с размерами много меньшими размеров отсчетного электрода. Причем пространственная обнаружительная способность ограничивается не размерами чувствительного элемента измерительного преобразователя, а физическими ограничениями. В зависимости от типа объекта контроля обнаружительная способность составляет 20...100 нм. Так как конструкция измерительного преобразователя представляет собой конденсатор [8], то измерения параметров поверхности объекта

контроля возможны при расположении на ней диэлектрических слоев (оксиды, краски, смазки и др.) толщиной до примерно 1 мм. Применение полунатурного принципа измерений с реализацией физико-математической модели в виде прикладной программы ЭВМ, которая связана с измерительной установкой через устройства сопряжения, позволяет оперативно изменять параметры дополнительных измерительных воздействий. Это позволяет гибко управлять алгоритмом и параметрами процесса измерения, оптимизировать процедуру измерения с целью уменьшения погрешности измерения.

Разработанный алгоритм процедуры многопараметрических измерений [2, 10], основанный на нахождении физического воздействия, обеспечивающего разделение измеряемых физических величин в математической модели взаимодействия объекта и первичного измерительного преобразователя, позволяет разрабатывать методы измерений на основе одноэлементного первичного преобразователя. Например, при измерениях электрического потенциала поверхности такими воздействиями являются изменение межэлектродного зазора и подсветка поверхности (для объекта контроля с полупроводниковыми свойствами поверхности).

Выводы

1. Применение принципов адаптивной односигнальной модели позволяет реализовать многопараметрические измерения электрического потенциала поверхности с использованием одного измерительного канала.
2. Многопараметрические измерения в рамках адаптивной односигнальной модели реализуются в структурной схеме одноканальной измерительной системы. Таким образом, увеличение числа измеряемых параметров пространственного рас-



ΔU – погрешность источника напряжения компенсации нулевого тока динамического конденсатора;
 Δd – инструментальная погрешность устройства установки межэлектродного зазора;
 ΔU_k – погрешность вольтметра;
 ΔX_d – погрешность модели определения типа дефекта по дистанционной зависимости $U(d)$

Рис. 3. Модель составляющих погрешности измерений параметров пространственного распределения характеристик поверхности

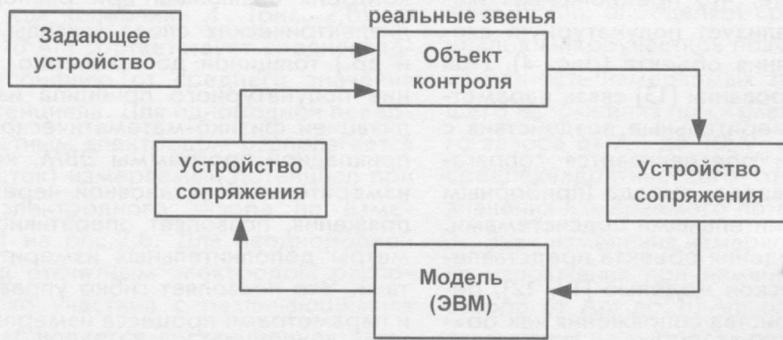


Рис. 4. Полунатурная модель измерения параметров объекта контроля

предела электрического потенциала поверхности не приводит к существенному усложнению измерительной установки.

3. Введение дополнительных измерительных воздействий позволяет расширить функциональные возможности методики измерения и снизить погрешность измерения электрического потенциала поверхности в случае пространственной неоднородности характеристик поверхности. Разработанная методика контроля параметров пространственного распределения электрического потенциала поверхности позволяет обнаруживать скопления микродефектов с размерами от 20...100 нм, что недостижимо в традиционных методах контроля с использованием метода зонда Кельвина.

Список использованной литературы

1. Сергеев А.Г. Метрология: учеб. пособие для вузов / А.Г. Сергеев, В.В. Крохин. – М.: Логос, 2001. – 408 с.
2. Нестеров, В.Н. Теоретические основы измерений составляющих векторных многокомпонентных физических величин // Измерительная техника. – 2004. – №7. – с.12–16.
3. Гусев О.К., Свистун А.И. Моделирование средств измерений параметров объектов с неопределенными состояниями // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2006. – № 5. – с. 34–39.
4. Гусев О.К., Свистун А.И. Методология измерений параметров объектов с неопределенными состояниями // Метрология и метрологическое обеспечение: тезисы докладов Междунар. научн.-техн. конф., Минск, 26-27 апр. 2007 г. / БелГИМ; редкол.: В.Н. Корешков [и др.]. – Минск, 2007. – с. 72–76.
5. Вудраф Д., Делчар Т. Современные методы исследования поверхности. – М.: Мир, 1989. – 564с.
6. Beierlein, T.A. Kelvin probe investigations of metal work functions and correlation to device performance of organic light-emitting devices / T.A. Beierlein, W. Brutting, H. Riel, E.I. Haskal, P. Muller, W. Rieß // Synth. Metals. – 2000. 111- 112, p. 295 – 297
7. Крейг, Радека. Исследование зависимости контактной разности потенциалов от механического

напряжения методом Кельвина // Приборы для научных исследований.- 1970.- № 2.- с.99-103.

8. Царев Б.М. Контактная разность потенциалов. – М.: Гостехиздат, 1955.- 280 с.

9. Авт. свидетельство СССР № 1628775, МКИ H01L 21/66, G01R 31/26. Способ определения равновесного поверхностного электростатического потенциала полупроводника / Гусев О.К., Васенко В.Н., Немцев В.С., Тявловский К.Л., Яржембицкий В.Б.

10. Гусев О.К., Тявловский К.Л. и др. Контроль параметров микронеравномерного распределения дефектов методом зонда Кельвина // "Материалы и структуры современной электроники" – Сборник научных трудов II Междунар. научн. конф., – Минск, октябрь 2006. – с.158-161

11. Woodall, I.M. Summary Abstract: Are they really Schottky barriers after all? / I.M. Woodall, I.L. Freouf // J. Vac. Sci. Technol. – 1982.- v.21.- № 2. – p.574-576.

12. Гусев О.К., Тявловский К.Л. и др. Формирование измерительного сигнала контактной разности потенциалов в случае неоднородной поверхности объекта // Материалы 2-й Междунар. научн. конф. "Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов", Могилев, октябрь 2006. – с.125-128.

13. Сазонов А.А. Автоматизация технологического оборудования микроэлектроники. – М.: Высшая школа, 1991. – 334 с.

Олег Константинович Гусев, доктор технических наук, профессор, декан приборостроительного факультета БНТУ;

Константин Леонидович Тявловский, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Информационно-измерительная техника и технологии» БНТУ;

Андрей Константинович Тявловский, кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационно-измерительная техника и технологии» БНТУ;

Роман Иванович Воробей, кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационно-измерительная техника и технологии» БНТУ;

Александр Иванович Свистун, ассистент кафедры «Информационно-измерительная техника и технологии» БНТУ;

Иван Анатольевич Ананчиков, студент БНТУ