

УДК 537.58

РЕЖИМ САМОКАЛИБРОВКИ ЗОНДА КЕЛЬВИНА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН

Воробей Р.И.¹, Гусев О.К.¹, Жарин А.Л.¹, Петлицкий А.Н.², Пилипенко В.А.², Турцевич А.С.²,
Тявловский А.К.¹

¹Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

²ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,

г. Минск, Республика Беларусь

e-mail: nil_pt@bntu.by

Повышение воспроизводимости и достоверности результатов контроля электрофизических параметров полупроводниковых пластин зондовыми зарядочувствительными методами обеспечивается в работе за счет реализации режима самокалибровки зонда Кельвина, при котором в качестве образца для калибровки используется поверхность самой контролируемой пластины. Измерения выполняются в сканирующем режиме с визуализацией результатов контроля в виде цветной карты распределения контролируемого параметра. Методика измерений, основанная на использовании режима самокалибровки зонда Кельвина, реализована в конструкции измерительной установки, обеспечивающей бесконтактный неразрушающий контроль и визуализацию дефектов полупроводниковых пластин и определение их основных электрофизических параметров, таких как длина диффузии и время жизни неравновесных носителей заряда, плотность и энергетический спектр заряда на ловушках и некоторых других.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, зонд Кельвина, полупроводниковая пластина, дефекты поверхности, визуализация потенциала поверхности.

Введение

Зондовые зарядочувствительные методы основаны на регистрации электрического потенциала поверхности относительно эталонного образца. Данные методы обладают высокой разрешающей способностью, чувствительностью к любым отклонениям электрофизических параметров полупроводниковых пластин, бесконтактностью измерений, возможностью измерений полупроводника под диэлектрическим покрытием. В настоящем исследовании в качестве базового использован метод Кельвина–Зисмана, известный в литературе также как зонд Кельвина [1].

Регистрируемый зондом Кельвина поверхностный электростатический потенциал является универсальным параметром, содержащим информацию о химических, структурных, механических, электронных свойствах поверхностей материалов, а также о скрытых границах

раздела материалов с диэлектрическими покрытиями. В случае полупроводников и металлов основной вклад в формирование потенциального рельефа поверхности вносит такая фундаментальная величина, как работа выхода электрона. В то же время высокая чувствительность зондовых зарядочувствительных методов к любым изменениям состояния поверхности образца и самого измерительного преобразователя (зонда Кельвина), в том числе и не вызванным влиянием контролируемого фактора, затрудняет интерпретацию результатов измерений [2, 3].

Принципиальным недостатком известных методов измерения электрофизических параметров полупроводниковых пластин на основе бесконтактной регистрации потенциала поверхности, в том числе с использованием дополнительных воздействий на образец, является низкая воспроизводимость результатов, получаемых с использованием различных зон-

дов или даже одного и того же зонда, но через большие интервалы времени [4]. Вследствие изменения состояния зонда Кельвина, определяемого трудно контролируруемыми процессами окисления, адсорбции и десорбции различных веществ на его поверхности и рядом других факторов, различие измеренных абсолютных значений потенциала поверхности одного и того же объекта может достигать 30 % [3, 4], что не позволяет считать результаты таких измерений достоверными.

Целью настоящего исследования являлось повышение воспроизводимости и достоверности результатов измерений электрофизических параметров полупроводниковых пластин зондовыми зарядочувствительными методами за счет реализации режима самокалибровки зонда Кельвина непосредственно в процессе измерений, выполняемых в режиме сканирования поверхности пластины.

Методика исследования

Для решения проблемы повышения воспроизводимости и достоверности результатов контроля в настоящем исследовании предлагается использовать режим самокалибровки зонда Кельвина, реализуемой непосредственно в процессе измерений, причем в качестве образца для калибровки используется поверхность самой контролируемой полупроводниковой пластины. При контроле дефектов полупроводниковой пластины в сканирующем режиме результаты сканирования содержат информацию как о дефектных, так и о бездефектных участках поверхности, причем последние легко могут быть определены на визуализированном изображении электрического потенциала поверхности. Поскольку состояние зонда Кельвина в течение процедуры сканирования не изменяется, результаты измерения электрического потенциала в дефектной и бездефектной области оказываются полученными при одинаковых условиях измерения, что обеспечивает необходимую воспроизводимость соотношения этих результатов. Полагая значения электрофизических параметров бездефектных участков априори известными (определяемыми технологией изготовления полупроводниковой пластины), полученные для таких участков значения измерительного сигнала можно принять за опорные (калибровочные), а отклонения электрофизических параметров дефектов определять по раз-

ности отсчетов измерительного сигнала в области дефектов и в калибровочной области. В этом случае применение методов визуализации электрического потенциала поверхности в сканирующем режиме электрометрического зонда в сочетании с дополнительными неразрушающими воздействиями делает возможным не только обнаружение дефектов пластины, но и количественное определение основных электрофизических параметров полупроводниковой структуры в области дефектов, таких как время жизни и длина диффузии неравновесных носителей заряда, плотность заряда на ловушках, подвижный заряд в диэлектрике и др.

Реализацию предлагаемой методики измерений обеспечивает измерительная установка для контроля электрофизических параметров полупроводниковых пластин, работа которой описывается схемой, приведенной на рисунке 1. Основу установки составляет устройство трех координатного перемещения, позволяющее позиционировать источник зарядки поверхности (генератор коронного разряда), электрометрический зондовый преобразователь (зонд Кельвина) и источники оптического излучения на требуемой точке поверхности пластины.

Установка с помощью зонда Кельвина позволяет получать картину распределения электростатического потенциала по поверхности пластины. Результаты регистрации отображаются в виде цветовой топограммы, где значения измеренного потенциала обозначаются индексными цветами. Значения электрофизических параметров в однородной части топограммы принимаются за опорные, используемые далее в качестве поправки при определении соответствующих параметров дефектов.

Регистрация электрического потенциала поверхности для определения электрофизических параметров пластины обеспечивается блоком измерительных преобразователей, который включает в себя зонд Кельвина, источник коронного разряда, набор источников оптического излучения на основе светодиодов с длинами волн 405, 470, 505 и 574 нм, а также источник белого света. В конструкции установки используются известные методы повышения информативности контроля с использованием зондовых зарядочувствительных методов, связанные с использованием дополнительных неразрушающих воздействий оптическим излучением и коронным разрядом. Анализ изменений

электрического потенциала поверхности полупроводниковой пластины при воздействии на нее оптическим излучением с различными длинами волны позволяет определить такие параметры полупроводника, как время жизни и длина диффузии неравновесных носителей заряда (ННЗ) на границе раздела [5]. Анализ динамики изменения потенциала поверхности

полупроводниковой пластины после воздействия коронным разрядом обеспечивает определение генерационного времени жизни ННЗ [6]. В то же время результаты таких измерений характеризуются низкими воспроизводимостью и достоверностью, что связано с неопределенностью состояния используемого в измерениях зонда Кельвина.

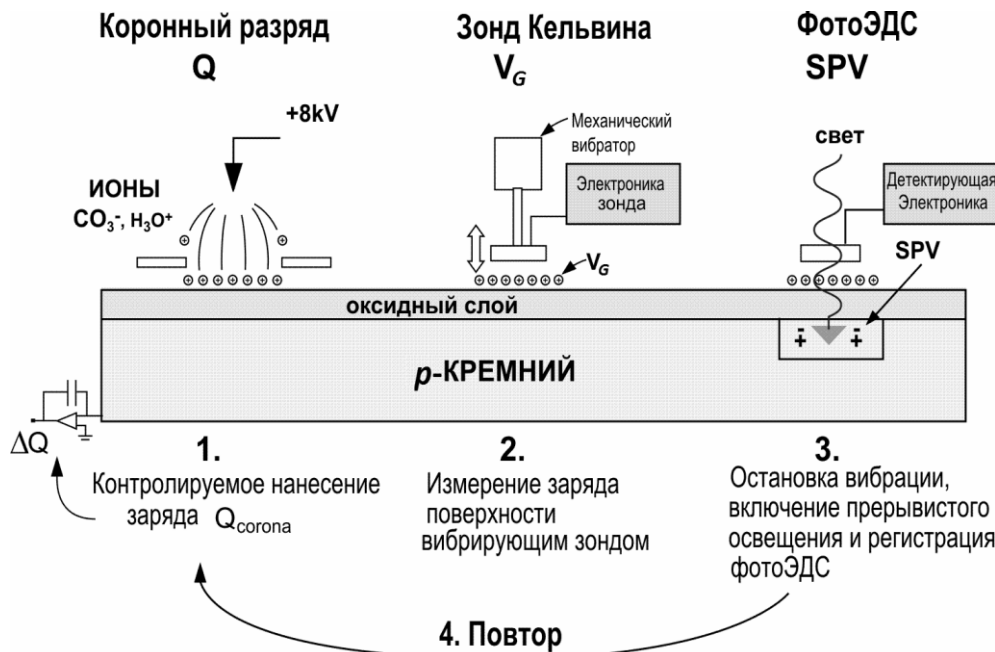


Рисунок 1 – Схема контроля полупроводниковых пластин с использованием методов зондовой электрметрии и воздействия коронным разрядом

Результаты исследования

Рассмотрим проблему повышения достоверности и воспроизводимости результатов контроля генерационного времени жизни ННЗ с использованием дополнительного воздействия коронным разрядом. Потенциал поверхности, получаемой в результате воздействия коронным разрядом структуры корона-окисел-полупроводник (КОП-структуры), включает аддитивную составляющую контактной разности потенциалов (КРП), зависящую от состояния поверхности зонда [6]:

$$V_G = V_{FB} + V_{ox} + \varphi_s, \quad (1)$$

где V_{FB} – напряжение плоских зон; φ_s – КРП между зондом и поверхностью образца; V_{ox} – напряжение на окисле, рассчитываемое как:

$$V_{ox} = \frac{Q_G}{C_{ox}} = -\frac{Q_S}{C_{ox}}, \quad (2)$$

где Q_G – плотность осажденного на поверхность заряда; Q_S – плотность заряда в полупроводнике; C_{ox} – удельная электрическая емкость окисла.

Отсюда:

$$V_G - V_{FB} = \varphi_s - \frac{Q_S}{C_{ox}} = \varphi_s - \frac{Q_b - Q_n}{C_{ox}}, \quad (3)$$

где Q_b – плотность заряда в объеме полупроводника; Q_n – плотность заряда в инверсионной области.

После воздействия коронным разрядом в отсутствие утечек величины Q_G и V_{ox} остаются неизменными. Дифференцируя (3), получим:

$$\frac{\partial V_G}{\partial t} = \frac{\partial \varphi_s}{\partial t}. \quad (4)$$

Таким образом, для определения динамики изменения потенциала поверхности достаточно зарегистрировать динамику изменения контак-

ной разности потенциалов, непосредственно измеряемой зондом Кельвина. На использовании данного равенства, не содержащего абсолютного значения КРП φ_S , основаны известные методы контроля электрофизических параметров полупроводниковых пластин [6]. В то же время, дальнейшее определение количественных значений электрофизических параметров полупроводниковой пластины требует наличия информации о состоянии зонда Кельвина и ряде параметров полупроводниковой пластины, как правило, неизвестных с достаточной точностью.

Плотность заряда в объеме полупроводника вычисляется как:

$$Q_b = -qN_A W = -\sqrt{2qK_S \epsilon_0 N_A \varphi_S}, \quad (5)$$

где N_A – число Авогадро; W – ширина ОПЗ; K_S – относительная диэлектрическая проницаемость поверхности образца; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная.

Полагая Q_G и Q_S постоянными во времени, получаем, что:

$$\frac{\partial Q_S}{\partial t} = 0 = -\frac{\partial Q_n}{\partial t} + \frac{\partial Q_b}{\partial t} = -\frac{\partial Q_n}{\partial t} - qN_A \frac{\partial W}{\partial t}. \quad (6)$$

Откуда, используя (5),

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_n}{\partial t} &= -\sqrt{\frac{2qK_S \epsilon_0 N_A}{2\varphi_S}} \frac{\partial \varphi_S}{\partial t} = -\frac{K_S \epsilon_0}{W} \frac{\partial \varphi_S}{\partial t} = \\ &= -\frac{K_S \epsilon_0}{W} \frac{\partial V_G}{\partial t}. \end{aligned} \quad (7)$$

Можно показать, что:

$$\frac{\partial V_G}{\partial t} = \frac{qn_i W}{K_S \epsilon_0} \left(\frac{W - W_{inv}}{\tau_{geff}} + s_{eff} \right), \quad (8)$$

где n_i – собственная концентрация носителей заряда в полупроводнике; W_{inv} – ширина ОПЗ при инверсии; τ_{geff} – эффективное время генерации; s_{eff} – эффективная скорость поверхностной генерации.

Данное выражение содержит ряд неизвестных величин, что исключает получение достоверных результатов при отсутствии априорной информации о параметрах полупроводника.

Как следует из (5), ширина ОПЗ W является функцией от величины КРП φ_S , зависящей от состояния зонда Кельвина. При этом зависимость скорости изменения потенциала поверхности $\partial V_G/\partial t$ от состояния зонда, характе-

ризуемого КРП φ_S , описывается существенно нелинейной функцией (рисунок 2). Следует, однако, принять во внимание, что для реальных полупроводниковых пластин величина s_{eff} в выражении (8) является пренебрежимо малой с точки зрения практических измерений. В этом случае связь между скоростью изменения потенциала поверхности $\partial V_G/\partial t$ и эффективным временем генерации (генерационным временем жизни) τ_{geff} описывается простой пропорцией вида:

$$\frac{\partial V_G}{\partial t} = \frac{A}{\tau_{geff}}, \quad (9)$$

где A – константа, зависящая от собственных параметров полупроводника и состояния зонда Кельвина.

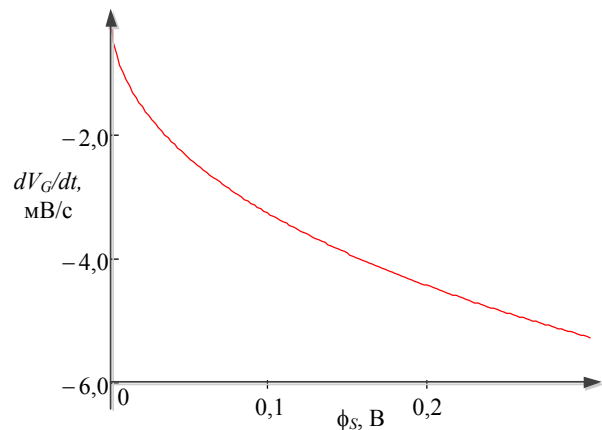


Рисунок 2 – Зависимость регистрируемой скорости изменения потенциала поверхности полупроводниковой пластины от величины контактной разности потенциалов для кремния *p*-типа с собственной концентрацией носителей заряда $n_i = 1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ при эффективном времени генерации $\tau_{geff} = 10 \text{ мкс}$

В соответствии с предлагаемой методикой измерений контроль электрофизических параметров полупроводниковой пластины должен проводиться в режиме сканирования всей поверхности пластины с построением визуализированного изображения электрического потенциала поверхности. Далее на визуализированном изображении выделяется свободная от дефектов область, среднее значение потенциала в которой принимается за опорную величину. Полагая значения электрофизических параметров в опорной (калибровочной) области известными, из выражения (9) можно рассчитать

значение калибровочной константы A и, таким образом, однозначно определить калибровочную характеристику в данной процедуре измерений (рисунок 3) и значения контролируемого параметра в остальных частях визуализированного изображения. Таким образом, определение поправки к показаниям измерительного преобразователя (калибровка) осуществляется с использованием в качестве калибровочного образца поверхности самого объекта измерений (самокалибровка зонда Кельвина), что обеспечивает высокую воспроизводимость результатов контроля и достоверность результатов измерений электрофизических параметров полупроводниковой пластины.

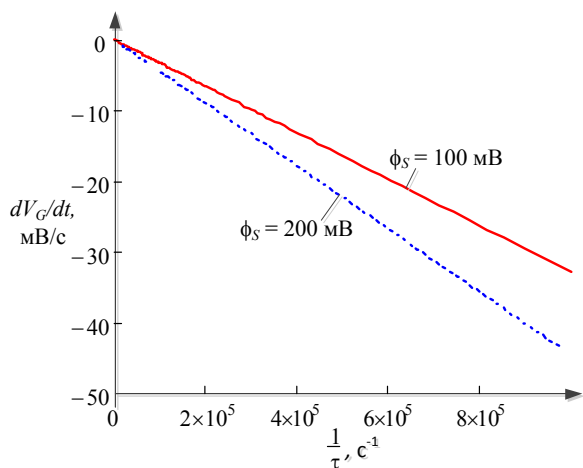


Рисунок 3 – Пример калибровочных характеристик для кремния p -типа с собственной концентрацией носителей заряда $n_i = 1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, соответствующих двум различным состояниям зонда Кельвина

Аналогичным образом осуществляется самокалибровка зонда Кельвина при определении других электрофизических параметров (плотности и энергетического спектра заряда на ловушках, концентрации примесей тяжелых металлов и др.). Важно отметить, что примеси легких щелочных металлов, таких как Na и K, являющиеся источником подвижного заряда в структуре кремний-диэлектрик, могут быть определены на основании предлагаемой методики непосредственно по разности значений потенциала поверхности полупроводниковой пластины без использования дополнительных воздействий.

На рисунке 4 показан пример визуализированного изображения пространственного распределения потенциала поверхности полупроводниковой пластины со структурой «кремний-

диэлектрик» диаметром 15 см. Пластина легирована акцепторной примесью с концентрацией примеси 10^{16} см^{-3} . Толщина слоя окисла составляла 425 Å (тонкий окисел). Образец прошел операцию отжига при температуре 1200 °C в течение 6 ч.

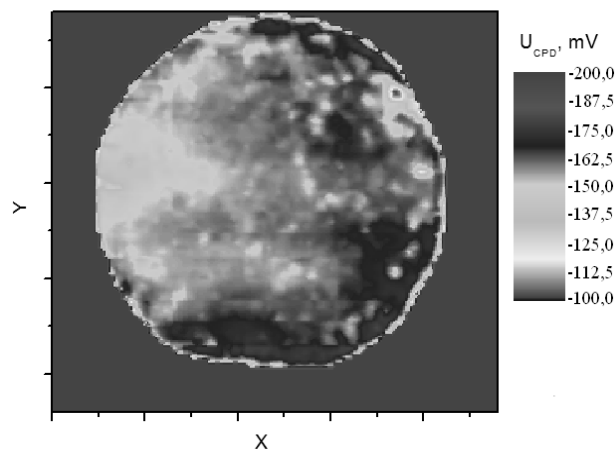


Рисунок 4 – Визуализация пространственного распределения потенциала поверхности полупроводниковой пластины (p -Si, $n_a = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $t_{ox} = 425 \text{ Å}$, отжиг при 1200 °C в течение 6 ч)

Потенциал поверхности в центральной части пластины был принят за опорный, а при назначении индексных цветов визуализированного изображения использовалась разность значений потенциала поверхности в расчетной точке с опорным значением. Такой подход обеспечил выявление дефектов на визуализированном изображении с последующим расчетом их электрофизических параметров независимо от состояния зонда. На рисунке 4 видна неоднородность электрофизических свойств поверхности, включая крупную дефектную область у левого края пластины, а также многочисленные локальные неоднородности, образующие «цепочки» пятен небольшого размера в правой части пластины. Время жизни ННЗ в опорной (калибровочной) области составляло 8,8 мкс. На основании описанной методики были определены значения времени жизни ННЗ в области дефектов, составившие от 3,5 мкс (крупная область) до 1,8 мкс (пятна в правой части пластины). Сопоставление результатов визуализации пространственного распределения потенциала поверхности полупроводниковой пластины после различных технологических операций (отжига, окисления, эпитаксии и т.д.) позволяет проследить развитие дефектов в процессе технологической обработки [7]. Как показали результаты проведенных исследова-

ний, калибровка визуализированного изображения по электрофизическим параметрам самого контролируемого образца позволяет сопоставлять результаты контроля после различных технологических операций обработки пластины, либо выполненного в разное время, независимо от изменения состояния поверхности зонда Кельвина.

Заключение

1. Основной недостаток зондовых зарядочувствительных методов контроля электрофизических параметров полупроводниковых пластин – низкая воспроизводимость результатов измерений, являющаяся следствием неопределенности состояния чувствительной поверхности зонда Кельвина. Известные методы повышения информативности контроля с использованием зондовых зарядочувствительных методов, включающие использование дополнительных неразрушающих воздействий оптическим излучением и коронным разрядом, обеспечивают определение таких электрофизических параметров, как время жизни и длина диффузии неравновесных носителей заряда, плотность и энергетический спектр заряда на ловушках и некоторых других, однако в отсутствие информации о состоянии зонда Кельвина количественное определение данных параметров не обеспечивается.

2. Повышение достоверности и воспроизводимости результатов контроля может быть обеспечено за счет реализации режима самокалибровки зонда Кельвина, при котором в качестве образца для калибровки используется сама поверхность контролируемой полупроводниковой пластины. Эффект самокалибровки достигается за счет присутствия на визуализированном изображении электрического потенциала поверхности пластины как дефектных, так и бездефектных областей, значения электрофизических параметров которых принимаются за опорные (номинальные).

3. Предложенная методика измерений, основанная на использовании режима самокалибровки зонда Кельвина, реализована в конструкции измерительной установки, обеспечивающей бесконтактный неразрушающий контроль и визуализацию дефектов полупроводниковых пластин и определение их основных электрофизических параметров.

Список использованных источников

1. *Zharin, A.L.* Contact Potential Difference Techniques as Probing Tools in Tribology and Surface Mapping // *Applied Scanning Probe Methods*. – 2010. – V. 14. – P. 687–720.
2. *Ибрагимов, Х.И.* Работа выхода электрона в физико-химических исследованиях / Х.И. Ибрагимов, В.А. Корольков. – М.: Интермет Инжиниринг, 2002. – 526 с.
3. *Тявловский, А.К.* Моделирование метрологических характеристик емкостных первичных преобразователей средств зондовой электрометрии / А.К. Тявловский, О.К. Гусев, А.Л. Жарин // *Приборы и методы измерений*. – 2011. – № 1(2). – С. 122–127.
4. *Kim, J.S.* Kelvin probe and ultraviolet photoemission measurements of indium tin oxide work function: a comparison / J.S. Kim [et al.] // *Synthetic Metals*. – 2000. – № 111–112. – Pp. 311–314.
5. *Kronik, L.* Surface photovoltage phenomena: theory, experiment, and applications / L. Kronik, Y. Shapira // *Surface Science Reports*. – 1999. – V. 37. – P. 1–206.
6. *Chiang, C. L.* Measurement of the minority-carrier diffusion length in thin semiconductor films / C. L. Chiang, R. Schwarz, D. E. Slobodin, J. Kolodzey, S. Wagner // *IEEE Trans. Electron Devices*. – 1986. – No. 33. – P. 1587–1592.
7. *Воробей, Р.И.* Контроль дефектов структуры кремний-диэлектрик на основе анализа пространственного распределения потенциала по поверхности полупроводниковых пластин / Р.И. Воробей [и др.] // *Приборы и методы измерений*. – 2013. – № 2(7). – С. 67–72.

**KELVIN PROBE SELF-CALIBRATION MODE FOR SEMICONDUCTOR WAFERS
PROPERTIES MONITORING**

*Vorobey R.I.¹, Gusev O.K.¹, Zharin A.L.¹, Petlitsky A.N.², Pilipenko V.A.², Turtsevitch A.S.²,
Tyavlovsky A.K.¹*

¹Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

²JSC "INTEGRAL" – Holding Management Company, Minsk, Belarus

e-mail: nil_pt@bntu.by

Abstract. Improvement of repeatability and reliability of semiconductor wafers properties monitoring with a probe charge-sensitive methods is achieved by realization of Kelvin probe self-calibration mode using a wafer's surface itself as a reference sample. Results of wafer surface scanning are visualized in the form of parameter distribution color map. A method of measurements based on Kelvin probe self-calibration mode is realized in a measurement installation for non-destructive non-contact monitoring of semiconductor wafer defects. Method can be used to define defects' physical properties including minority carrier diffusion length and lifetime, trapped charge density and energy distribution etc.

Keywords: nondestructive monitoring, Kelvin probe, semiconductor wafer, surface defects, surface potential visualization.

References

1. Zharin A.L. Contact Potential Difference Techniques as Probing Tools in Tribology and Surface Mapping. *Applied Scanning Probe Methods*, 2010, vol. 14, pp. 687–720.
2. Ibragimov H.I., Korol'kov V.A. *Rabota vykhoda elektrona v fiziko-khimicheskikh issledovaniyakh* [Electron work function in physical and chemical studies]. Moscow, Intermet Engineering Publ., 2002. 526 p.
3. Tyavlovsky A.K., Gusev O.K., Zharin A.L. [Metrological performance modeling of probe electrometers capacitive sensors]. *Pribory i metody izmerenij*, 2011, no. 1(2), pp. 122–127 (in Russian).
4. Kim J.S., Lagel B., Moons E., Johansson N., Baikie I.D., Salaneck W.R., Friend R.H., Cacialli F. Kelvin probe and ultraviolet photoemission measurements of indium tin oxide work function: a comparison. *Synthetic Metals*, 2000, vol. 111–112, pp. 311–314.
5. Kronik L., Shapira Y. Surface photovoltage phenomena: theory, experiment, and applications. *Surface Science Reports*, 1999, vol. 37, pp. 1–206.
6. Chiang C.L., Schwarz R., Slobodin D.E., Kolodzey J., Wagner S. Measurement of the minority-carrier diffusion length in thin semiconductor films. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1986, vol. 33, pp. 1587–1592.
7. Vorobey R.I., Zharin A.L., Gusev O.K., Petlitsky A.N., Pilipenko V.A., Turtsevitch A.S., Tyavlovsky A.K., Tyavlovsky K.L. [Study of silicon-insulator structure defects based on analysis of a spatial distribution of a semiconductor wafer's surface potential]. *Pribory i metody izmerenij*, 2013, no. 2(7), pp. 67–72 (in Russian).

Поступила в редакцию 30.10.2014.