тельного преобразователя бесконтактного вибрирующего зонда Кельвина обеспечивается возможность контроля полупроводниковых структур под слоем диэлектрика до 20 000 нм и более без увеличения погрешности измерений. Максимальное пространственное разрешение топограммы составляет 0,5 мм. Имеется возможность выбора шкалы условных цветов для топограммы с целью более четкой (контрастной) визуализации областей скопления дефектов.

УДК 621.382

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ЗАРЯДА НА ЛОВУШКАХ В СТРУКТУРЕ КРЕМНИЙ-ДИЭЛЕКТРИК СРЕДСТВАМИ ЗОНДОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ

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

¹Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь ²НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «Интеграл», Минск, Республика Беларусь

Использование С-V характеристик для характеризации полупроводниковой структуры (ППС) основано на зависимости ширины области пространственного заряда (ОПЗ) от величины приложенного к ней напряжения. При бесконтактной регистрации С-V характеристик средствами зондовой электрометрии данное напряжение создается при контролируемом осаждении на окисленную поверхность ППС электрического заряда с помощью источника коронного разряда. Тыльная сторона ППС заземлена за счет омического контакта с заземленным держателем образцов и имеет потенциал, равный нулю. Таким образом. приложенное к структуре напряжение U будет численно равно электрическому потенциалу поверхности Vs. Для определенности далее будет рассматриваться кремний р-типа как наиболее распространенный случай полупроводникового материала. Для регистрации С-V характеристики на поверхность такой структуры осаждаются ионы как положительного, так и отрицательного знака

Результирующий потенциал, измеряемый зарядочувствительным электрометрическим зондом, включает три аддитивных составляющих [1], соответствующих падениям напряжения на ОПЗ, диэлектрике и воздушном зазоре между поверхностью ППС и чувствительным элементом зонда (рисунок 1):

$$V = V_D + V_{SCR} + V_{CPD}$$
, (1)
где V_D – падение напряжения на диэлектрике;

 V_{SCR} – падение напряжения на Дизлектри V_{SCR} – падение напряжения на ОПЗ;

V_{CPD} – контактная разность потенциалов (КРП), определяемая разностью значений работы выхода электрона (РВЭ) чувствительного элемента зонда и исследуемого полупроводника [2].

С учетом (3) выражение для удельной электрической емкости ППС можно записать в виде

К настоящему времени измерительная система контроля полупроводниковых пластин СКАН-2013 изготовлена в одном экземпляре. Изготовленный экземпляр используется в НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» для научных исследований в рамках разработки новых методов неразрушающего контроля полупроводниковых пластин с структурой кремнийдиэлектрик с субмикронными слоями.

$$C = -\frac{\Delta Q_S + \Delta Q_{it}}{\Delta V_D + \Delta V_{CPD}},\tag{2}$$

где ΔQ_S – приращение заряда в ОПЗ; ΔQ_{ii} – приращение заряда на ловушках на границе раздела.



Рисунок 1 – Схема формирования результирующего потенциала V, измеряемого зарядочувствительным электрометрическим зондом

Плотность заряда в полупроводнике Q_s , численно равная (с учетом противоположного знака) плотности осажденного заряда на поверхности диэлектрика ППС, включает в себя заряд дырок Q_p , заряд в объеме ОПЗ Q_b и заряд электронов Q_n , то есть

$$Q_S = Q_p + Q_b + Q_n. \tag{3}$$

(4)

Подставляя (3) в (2), получим

С

=

$$-\frac{1}{\frac{\Delta V_D}{\Delta Q_S + \Delta Q_{it}} + \frac{\Delta V_{CPD}}{\Delta Q_p + \Delta Q_b + \Delta Q_n + \Delta Q_{it}}},$$
откуда

$$C = \frac{1}{\frac{1}{C_d} + \frac{1}{C_p + C_b + C_n + C_{it}}} = (C_d^{-1} + (C_{SCR} + C_{it})^{-1})^{-1},$$
(5)

где *C*_d – удельная емкость диэлектрика; *C*_{SCR} – удельная емкость ОПЗ;

C_{it} – емкость, обусловленная наличием ловушек на границе раздела.

Регистрируя Q-V характеристику путем последовательного воздействия на ППС импульсами коронного разряда и бесконтактного измерения потенциала поверхности после каждого импульса воздействия и анализируя форму полученной характеристики, можно определить величину порогового напряжения V_{TH} , соответствующего переходу полупроводника в состояние инверсии, без риска повреждения структуры. Это обеспечивает возможность получения C-V характеристики ППС в более широком диапазоне значений потенциала поверхности, чем при традиционных контактных измерениях.

Комбинирование дополнительных воздействий на ППС коронным разрядом и интенсивным оптическим излучением видимого диапазона позволяет определить напряжение плоских зон полупроводника V_{FB} , зная которое из Q-Vхарактеристики можно найти величину полного заряда диэлектрика Q_{TOT} . Для определения величины V_{FB} измерения КРП поверхности при каждом цикле воздействия коронным разрядом необходимо производить дважды: в темноте (V_{CPD}^{dk}) и при интенсивном освещении (V_{CPD}^{lr}). На основании этих двух измерений рассчитывается величина поверхностного изгиба энергетических зон, численно равная поверхностной фотоЭДС:

$$V_{SPV} = V_{CPD}{}^{dk} - V_{CPD}{}^{lt}.$$
 (6)

Критерием достижения состояния плоских зон является равенство нулю величины V_{SPV} . В этом случае $V_{FB} = V_{CPD}^{dk}$. Интегральная плотность заряда, нанесенного на поверхность ППС к моменту достижения состояния плоских зон (с учетом утечки через диэлектрик), будет численно равна плотности полного заряда диэлектрика Q_{TOT} , что позволяет вычислить ее как сумму доз всех импульсов коронного разряда, воздействовавших на данный участок ППС, за вычетом суммы всех утечек заряда за время измерения.

Теоретическое значение порогового напряжения рассчитывается по известной формуле [3]

$$V_{TH} = \frac{2kT}{q} ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right),\tag{7}$$

где *N*₄ – концентрация легирующей акцепторной примеси;

n_i –концентрация носителей заряда в собственном полупроводнике. Экспериментально определив величину V_{TH} по перегибу Q-V характеристики, из (7) можно вычислить концентрацию легирующей примеси в данной области полупроводника.

При практических измерениях необходимо также учитывать ограничения, связанные с возможностью пробоя диэлектрика ППС при высокой плотности заряда. В связи с этим, в рамках разрабатываемой методики измерений циклическое осаждение заряда на поверхность предусматривается до тех пор, пока график *Q-V* характеристики не достигает насыщения, либо пока плотность заряда на поверхности не достигает величины 10⁷ Кл/см², что близко к пробойной величине для большинства ППС.

Величина падения напряжения на ОПЗ при данной величине плотности заряда на поверхности Q_S может быть найдена на основании экспериментально зарегистрированной Q-V характеристики из выражения

$$V_{SCR}(Q_S) = \Delta V_{CPD}^{\ \ dk} - \Delta V_D,$$
 (8)
где $\Delta V_{CPD}^{\ \ dk}$ – приращение КРП при изменении

заряда поверхности на
$$\Delta Q_S$$
;
 $\Delta V_D = \frac{\Delta Q_S}{C_d}$. (9)

Зная $V_{SCR}(Q_S)$, по известным соотношениям [3] можно найти заряд ОПЗ Q_{SCR} . Отсюда плотность заряда на ловушках может быть вычислена как

$$\Delta Q_{it} = -(\Delta Q_S - \Delta Q_{SC}). \tag{10}$$

Плотность ловушек на границе раздела полупроводник-диэлектрик может быть вычислена как первая производная от полученной результирующей зависимости $\Delta O_{it}(V_{SCR})$:

$$D_{it} = \frac{d\Delta Q_{it}}{dV_{SCR}}.$$
(11)

Поскольку ловушки на границе раздела полупроводник-диэлектрик занимают различные энергетические уровни, вычисленные значения *D*_{*it*} будут различными для разных значений плотности заряда на поверхности *Q*_S. Поскольку падение напряжения на ОПЗ численно равно энергии (энергетическому уровню) заряда на ловушках, выраженной в электрон-вольтах, то построив зависимость $D_{it}(V_{SCR})$, можно получить энергетический спектр заряда на ловушках в структуре кремний-диэлектрик. Таким образом, совместная регистрация С-V и Q-V характеристик в односигнальной модели многопараметрических измерений потенциала поверхности ППС с помощью электрометрического зонда позволяет получить все искомые параметры, а именно плотность ловушек на границе раздела полупроводник-диэлектрик, плотность и энергетический спектр заряда на ловушках на границе раздела.

1. Schroder, D.K. Semiconductor Material and Device Characterization / D.K. Schroder // Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, Inc. -2006. - 790 p.

2. Zharin, A. L. Contact Potential Dierence Techniques as Probing Tools in Tribology and Surface Mapping // Scanning Probe Microscopy in Nanoscience and Nanotechnology (edited by B.

УДК 621.382

МЕТОДИКА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РВЭ

Воробей Р.И.¹, Гусев О.К.¹, Жарин А.Л.¹, Мухуров Н.И.², Тявловский А.К.¹, Тявловский К.Л.¹, Свистун А.И.¹, Дубаневич А.В.¹

912 c.

¹Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь ²Институт физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Функциональность, надежность и технические характеристики микросенсорных устройств на основе наноструктурированных материалов в значительной степени зависят от чистоты и однородности электрофизических свойств их поверхности. Особенностью таких устройств является требование, в ряде случаев, распределения свойств поверхности по определенному закону. Вследствие высокой чувствительности микросенсорных устройств контроль качества поверхности должен выполняться бесконтактным неразрушающим способом, что обеспечивают методы, основанные на измерении контактной разности потенциалов (КРП) поверхности с помощью бесконтактного зонда Кельвина [1].

В результате проведенных исследований разработаны технические требования к методике сплошного неразрушающего контроля электрофизических свойств чувствительных элементов из наноструктурированных материалов для нового поколения датчиков потока космической плазмы. В основу методики положен метод измерения контактной разности потенциалов на основе динамического конденсатора (метод Кельвина-Зисмана), основанный на явлении возникновения разности электростатических потенциалов между двумя проводящими пластинами, характеризующимися различными значениями работы выхода электрона (РВЭ) поверхности ф₅ и фр при обеспечении условий для беспрепятственного обмена носителями заряда между ними. Последнее может быть обеспечено. например, за счет сближения пластин на малое расстояние, достаточное для обмена электронами вследствие эффекта термоэмиссии при нормальной температуре, за счет ионизации воздуха в зазоре между пластинами (метод Кенрика) или за счет внешней электрической цепи (метод Кельвина-Зисмана). В соответствии с условием термодинамического равновесия, при этом должно происходить выравнивание уровней Ферми, что приводит к возникновению разности потенциалов между пластинами. Метод Кельвина-Зисмана предполагает включение в цепь измерительного конденсатора, формируемого пластинами, источника компенсирующей ЭДС UCPD, обеспечи-

Bhushan). - Springer Heidelberg Dordrecht

3. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов: В 2 кн. Кн. 1,2 / С. Зи. – М.: Мир, 1984. –

London New York, 2010. - P. 687-720.

вающей приведение к нулю протекающих между пластинами токов. Тогда в состоянии равновесия будет соблюдаться условие

$$eU_{CPD} + \varphi_S - \varphi_P = 0,$$
 (1)
откуда

$$U_{CPD} = \frac{\varphi_P - \varphi_S}{e}.$$
 (2)

Величина U_{CPD} характеризует разность потенциалов поверхности исследуемого образца и измерительного преобразователя. Работа выхода электрона ϕ_S проводящей поверхности, в том числе наноструктурированной, связана с такими характеристиками материала, как наличие и концентрация дислокаций кристаллической структуры, внутренние механические напряжения, межкристаллитная коррозия, отклонения химического состава поверхности и т.п. Существенно, что при измерениях РВЭ методом Кельвина-Зисмана выходной сигнал зонда пропорционален среднему значению РВЭ в области контроля, а не ее минимальному значению, как при использовании эмиссионных методов [2]. Поскольку для наноструктурированных поверхностей типичные размеры дефектов много меньше линейных размеров зонда, такое аппаратное усреднение сигнала обеспечивет интегральную оценку плотности дефектов в области контроля, тогда как эмиссионные методы дают менее диагностически значимую экстремальную оценку. Таким образом, измерения РВЭ поверхности чувствительных элементов из наноструктурированных материалов на основе контроля электростатических потенциалов позволяют выявлять дефекты их поверхности и оценивать их концентрацию. При этом величина φ_P , как правило, неизвестна и может изменяться под влиянием факторов окружающей среды, главным образом, вследствие адсорбции различных веществ на поверхности измерительного преобразователя. Такие изменения являются сравнительно медленными, и при измерениях электростатического потенциала поверхности образца в скани-