

УДК 004.415.2:681.785.423.3

## УМЕНЬШЕНИЕ ШУМОВОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СИГНАЛА СКАНИРУЮЩЕГО ЗОНДА КЕЛЬВИНА

Воробей Р.И.<sup>1</sup>, Гусев О.К.<sup>1</sup>, Жарин А.Л.<sup>1</sup>, Свистун А.И.<sup>1</sup>, Тявловский А.К.<sup>1</sup>, Тявловский К.Л.<sup>1</sup>, Пилипенко В.А.<sup>2</sup>, Петлицкий А.Н.<sup>2</sup><sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь<sup>2</sup>ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»  
Минск, Республика Беларусь

Методы зондовой электрометрии, и в частности метод сканирующего зонда Кельвина, являются эффективным инструментом неразрушающего исследования и контроля электрофизических свойств поверхности и ее скрытых дефектов [1]. Повышение разрешающей способности контроля может быть достигнуто уменьшением поперечных размеров чувствительного элемента зонда Кельвина при одновременном уменьшении зазора зонд-образец, причем последнее имеет определяющее значение для пространственной разрешающей способности [2]. В то же время, уменьшение зазора зонд-образец при сохранении амплитуды вибрации подвижной обкладки динамического конденсатора на постоянном уровне приводит к увеличению коэффициента модуляции динамического конденсатора, делая его существенно нелинейной системой. Для такой системы характерно эффективное детектирование сигнала помехи, что приводит к возрастанию уровня шумов и уменьшению отношения сигнал/шум сканирующего зонда Кельвина [3].

Основным источником сигнала помехи являются проводящие элементы конструкции самого измерительного преобразователя, составляющие с чувствительным элементом зонда Кельвина две обкладки паразитного динамического конденсатора (рисунок 1). Потенциал поверхности элементов конструкции измерительной системы, в общем случае, отличается от потенциала поверхности чувствительного элемента измерительного преобразователя электростатического потенциала. Это может быть как следствием наличия напряжения обратной связи на чувствительном элементе (при использовании компенсационной схемы измерения), так и следствием разности значений работы выхода электрона материалов чувствительного элемента и конструкции установки, что приводит к возникновению между ними паразитной контактной разности потенциалов  $U_{st}$ . В эквивалентной схеме входной цепи измерительного преобразователя присутствие такого паразитного сигнала помехи можно отобразить источником постоянного напряжения  $U_{st}$ , подключенным ко входу усилителя сигнала электростатического потенциала (зарядочувствительного преусилителя) через емкостную развязку C2. Таким образом, источник измерительного сигнала  $U_{CPD}$  и источник

помехи  $U_{st}$  по отношению ко входу измерительного преобразователя оказываются включены параллельно, а входной ток  $I$  зарядочувствительного преусилителя представляет собой сумму токов, создаваемых этими двумя источниками. При этом эквивалентная схема измерительного преобразователя, реализующая компенсационный метод измерения, принимает вид, показанный на рисунке 2.

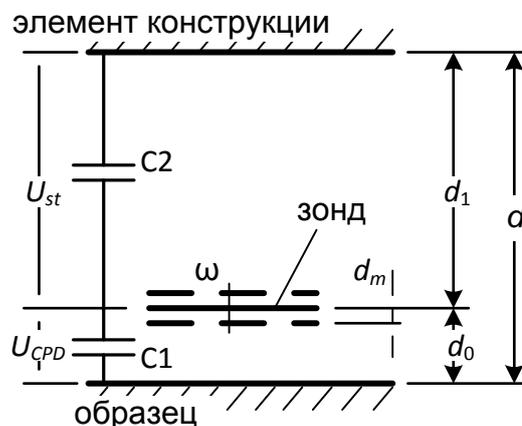


Рисунок 1 – Схема формирования паразитного динамического конденсатора на входе измерительного преобразователя.

Конденсатор C1 в эквивалентной схеме соответствует взаимной электрической емкости чувствительного элемента и поверхности образца, C2 – взаимной электрической емкости чувствительного элемента и элементов конструкции измерительной системы. В норме выполняется соотношение  $C2 \ll C1$ . Резистор R соответствует активной составляющей входного импеданса зарядочувствительного преусилителя. Емкостная составляющая входного импеданса рассматриваемый измерительный преобразователь реализует компенсационный метод измерений, в схему введен источник напряжения обратной связи  $U_b$ .

Чувствительный элемент зонда Кельвина вибрирует с круговой частотой  $\omega$  и амплитудой  $d_m$ , что приводит к модуляции емкости измерительного и паразитного динамических конденсаторов с существенно различными коэффициентами мо-

дуляции  $m_0$  и  $m_1$ :

$$\begin{aligned} m_0 &= \frac{d_m}{d_0}; \\ m_1 &= \frac{d_m}{d_1}. \end{aligned} \quad (1)$$

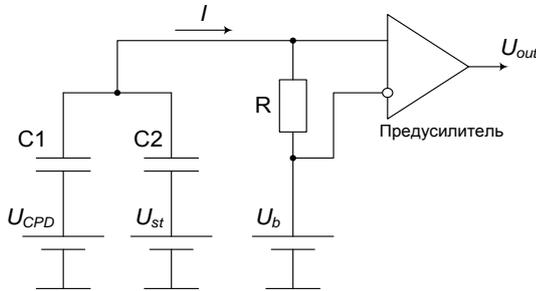


Рисунок 2 – Эквивалентная схема входной цепи измерительного преобразователя, учитывающая наличие паразитного динамического конденсатора.

Математическая модель входного тока измерительного преобразователя при этом принимает вид

$$\begin{aligned} I = \frac{d}{dt} & \left( (U_{CPD} - U_b) \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d + d_m \sin \omega t} + \right. \\ & \left. + (U_{st} - U_b) \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d - d_0 - d_m \sin \omega t} \right). \end{aligned} \quad (2)$$

Выходной сигнал  $U_{out}$  измерительного преобразователя, реализующего компенсационную схему измерений, численно равен напряжению компенсации  $U_b$ . Нелинейность уравнения (1) делает поиск его решения относительно  $U_b$  в общем виде чрезвычайно сложной задачей. Приближенное решение для конкретных частных случаев с известными значениями всех параметров в уравнении (2) может быть получено на основе численного моделирования с использованием средств компьютерной техники [3]. Разность между значениями  $U_b$  и  $U_{CPD}$  при этом, очевидно, составляет погрешность измерения контактной разности потенциалов  $\Delta U$ , вызванную наличием паразитного динамического конденсатора. Результаты компьютерного моделирования показали, что эта погрешность, в общем случае, может быть представлена как сумма двух составляющих – постоянной и переменной, (рисунок 3), причем последняя представлена гармоническими составляющими в степенях  $-1$ ,  $0$ ,  $1$  и  $2$ . При этом частота переменной составляющей  $\Delta U$  совпадает с частотой измерительного сигнала, что не позволяет устранить ее путем фильтрации.

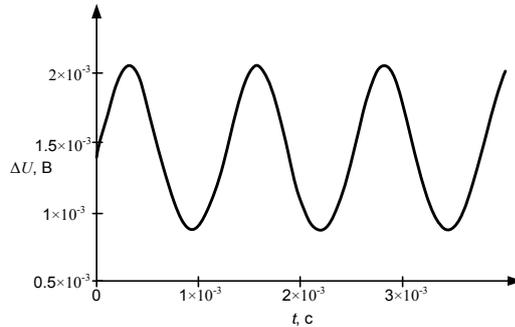


Рисунок 3 – Шумовая составляющая сигнала сканирующего зонда Кельвина при  $m_0 = 0,2$ ,  $U_{CPD} = 300$  мВ,  $U_{st} = -200$  мВ,  $d_1/d_0 = 20$ .

Величины как переменной, так и постоянной составляющих шума резко возрастают с уменьшением зазора в динамическом конденсаторе, как это наглядно видно из приведенных на рисунке 4 результатов численного моделирования. Данные результаты позволяют сделать вывод, что для эффективного уменьшения шумов сканирующего зонда Кельвина соотношение зазоров в паразитном и измерительном динамических конденсаторах должно составлять не менее  $d_1/d_0 = 20$ ; отношение сигнал/шум при этих условиях и принятых для моделирования численных значениях параметров составляет приблизительно 46 дБ. Дальнейшее увеличение зазора (отдаление элементов конструкции измерительного преобразователя от чувствительного элемента) не приводит к существенному уменьшению сигнала наводки.

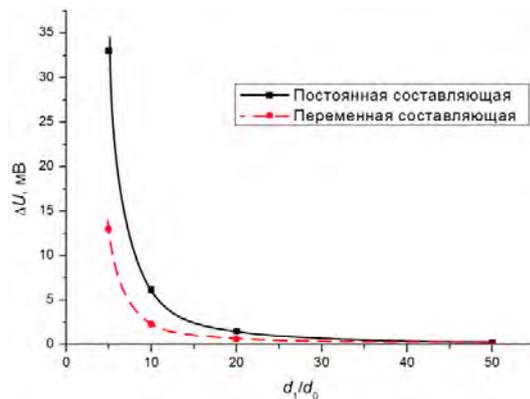


Рисунок 4 – Зависимость составляющих шума сканирующего зонда Кельвина от соотношения зазоров в паразитном и измерительном конденсаторах ( $m_0 = 0,2$ ,  $U_{CPD} = 300$  мВ,  $U_{st} = -200$  мВ).

- Zharin A.L. Contact Potential Difference Techniques as Probing Tools in Tribology and Surface Mapping // Scanning Probe Microscopy in Nanoscience and Nanotechnology (edited by B. Bhushan). – Springer Heidelberg Dordrecht London New York. – 2010. – P. 687-720
- Тявловский А.К. Математическое моделиро-

- вание дистанционной зависимости разрешающей способности сканирующего зонда Кельвина // Приборы и методы измерений. – 2012. – № 1(4). – С. 30-36.
3. Danyluk S. Kelvin probe's stray capacitance and

noise simulation / S. Danyluk, A.V. Dubanevich, O.K. Gusev, A.I. Svistun, A.K. Tyavlovsky, K.L. Tyavlovsky, R.I. Vorobey, A.L. Zharin // Devices and Methods of Measurements. – 2014. – № 1. – Р. 94-98.

УДК 537.58:621.891

## ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИМЕСИ ЖЕЛЕЗА В КРЕМНИИ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ЗОНДОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ

Воробей Р.И.<sup>1</sup>, Жарин А.Л.<sup>1</sup>, Микитевич В.А.<sup>1</sup>, Тявловский А.К.<sup>1</sup>, Тявловский К.Л.<sup>1</sup>, Пилипенко В.А.<sup>2</sup>, Петлицкий А.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»  
Минск, Республика Беларусь

На характеристики приборных полупроводниковых структур определяющее влияние оказывают дефекты кристаллической структуры исходной заготовки (кремниевой пластины). Присутствие в кристаллической решетке кремния атомов таких металлов как железо, медь, золото, никель и некоторых других приводит к возникновению центров рекомбинации, вероятность захвата и ре-комбинации неравновесных носителей заряда (ННЗ) на которых достаточно высока, что приводит к уменьшению времени жизни и длины диффузии ННЗ и, соответственно, снижению электрических характеристик полупроводникового устройства. Наиболее значимой является примесь железа, источником которой являются элементы технологического оборудования, изготовленные из стали. Используемые в настоящее время методы контроля примесей металлов в кремнии носят разрушающий характер, связаны с повреждением поверхности полупроводниковой пластины и вследствие этого требуют использования пластин-спутников, что снижает производительность линии (за счет изъятия части заготовок из технологического процесса на разных его стадиях), увеличивает себестоимость конечной продукции и не обеспечивает необходимой достоверности контроля.

Разработанная методика визуализации пространственного распределения примеси железа в кремнии предусматривает исследование поверхности сканирующим электрометрическим зондом (зондом Кельвина), обеспечивающим регистрацию контактной разности потенциалов (КРП) или, при использовании дополнительного воздействия оптическим излучением, поверхностной фотоЭДС без непосредственного механического контакта зонда с исследуемой поверхностью [1]. За счет этого обеспечивается отсутствие каких-либо разрушающих воздействий на поверхность образца. В основу определения концентрации примеси железа в кремнии положена

двукратная регистрация поверхностной фотоЭДС до и после воздействия на полупроводниковую пластину умеренным нагревом (до 200 °С) в течение 1...10 минут. Согласно общепринятой теоретической модели, атомы железа, попадающие на поверхность кремния *p*-типа в виде загрязнений, химически связываются с легирующей примесью бора, формируя пары Fe-B. Из-за нестойкости данного соединения кратковременный нагрев загрязненной полупроводниковой пластины до температуры 180...200 °С приводит к распаду пар Fe-B на легирующий бор и интерстициальное железо Fe<sub>i</sub>, атомы которого располагаются между узлами кристаллической решетки кремния [2]. В отсутствие создаваемых парами Fe-B центров рекомбинации время жизни ННЗ в приповерхностных слоях кремния возрастает, что может быть зарегистрировано по изменению величины поверхностной фотоЭДС [3]. Интенсивный процесс повторного формирования пар Fe-B начинается спустя 2 ч после охлаждения образца до комнатной температуры [2], вследствие чего дальнейшие измерения должны выполняться в пределах этого интервала времени.

Данная методика реализована в конструкции и программном обеспечении разработанной в НИЛ полупроводниковой техники БНТУ измерительной установки для неразрушающей бесконтактной характеристики полупроводниковых структур с субмикронными слоями по параметрам пространственного распределения времени жизни и примеси железа в кремнии *p*-типа (рисунки 1 и 2). Рабочее пространство установки разделено на две изолированные зоны: зону измерений и зону нагрева. Образец (полупроводниковая пластина диаметром до 200 мм) закрепляется на подвижном держателе с помощью вакуумного прижима (присоски). Система трехкоординатного перемещения на основе шаговых двигателей обеспечивает как сканирование поверхности образца, так и его перемещение в зону