

объектов со слоистой и неоднородной структурой являются основой для решения широкого спектра задач в машиностроении, станкостроении

УДК 537.58

## ЗОНДОВЫЕ ЗАРЯДОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН

Гусев О.К.<sup>1</sup>, Жарин А.Л.<sup>1</sup>, Петлицкий А.Н.<sup>2</sup>, Пилипенко В.А.<sup>2</sup>, Турцевич А.С.<sup>2</sup>,  
Тявловский А.К.<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «Интеграл», Минск, Республика Беларусь

Развитие микроэлектроники связано с постоянным уменьшением размеров элементов интегральных схем, вследствие чего требования к дефектности исходных полупроводниковых пластин и методам контроля однородности распределения их параметров постоянно ужесточаются. Так, согласно *The International Technology Roadmap for Semiconductors* [1] при производстве ИМС технологического уровня «22/20 нм», требуемая чувствительность средств контроля и визуализации дефектов пластин достигает  $5 \cdot 10^9$  атомов/см<sup>2</sup>. Данные требования многократно превосходят возможности оптической микроскопии и близки к пределу для электронной микроскопии. Особой проблемой является задача исследования свойств границ раздела кремний-диэлектрик, не решаемая традиционными методами.

Зондовые зарядочувствительные методы основаны на регистрации электрического потенциала поверхности с помощью бесконтактного емкостного зонда (например, зонда Кельвина). Размеры зонда могут составлять от единиц сантиметров до долей нанометра [2] (в частности, возможна реализация режима зонда Кельвина в атомно-силовом микроскопе), вследствие чего для зондовых методов практически отсутствуют ограничения по пространственной разрешающей способности. Кроме того, они чувствительны к различным отклонениям электрофизических параметров полупроводниковых пластин, обеспечивают бесконтактные измерения и возможность выполнения контроля полупроводника под диэлектрическим покрытием (подзатворным диэлектриком). Это обеспечивает интерес к ним с точки зрения контроля полупроводниковых пластин.

Поверхностный электростатический потенциал является универсальным параметром, содержащим информацию о химических, структурных, механических, электронных свойствах поверхностей материалов, а также о границах раздела материалов с диэлектрическими и проводящими покрытиями. В случае полупроводников основной вклад в формирование потенциального рельефа поверхности вносит такая фун-

даментальная величина, как работа выхода электрона. Применение методов визуализации электрического потенциала поверхности при использовании сканирующего режима электрометрического зонда делает возможным обнаружение отклонений химического состава поверхности, дефектной структуры, и т.п. В то же время, высокая чувствительность существующих средств измерений поверхностного потенциала к любым изменениям состояния поверхности образца и самого электрометрического зонда, в том числе и не вызванным влиянием контролируемого фактора, затрудняет интерпретацию результатов измерений [3]. Для повышения информативности методов визуализации потенциального рельефа поверхностей возможно использование оптического излучения различных длин волн, изменяющего структуру энергетических уровней приповерхностных слоев образца, и коронного разряда, с помощью которого на диэлектрической пленке осаждается электрический заряд. Пространственное распределение заряда, анализ динамики его стекания, нейтрализации и миграции позволяют контролировать распределение свойств не только диэлектрика, но и скрытых границ раздела, а также области пространственного заряда (ОПЗ) в полупроводнике, что недоступно другим неразрушающим методам контроля.

В НИЛ полупроводниковой техники БНТУ совместно с НПО «Интеграл» проводятся исследования и разработка приборов и методов визуализации электрофизических параметров полупроводниковых пластин на основе зондовых зарядочувствительных методов, в том числе с использованием дополнительных воздействий оптическим излучением и/или коронным разрядом для выявления и анализа конкретных типов дефектов полупроводниковых пластин (подвижного заряда в диэлектрике, загрязнений тяжелыми металлами, плазменных повреждений, нарушений целостности диэлектрика и др.).

На рисунке 1 представлена схема созданной установки. В основе установки лежит устройство 3-х координатного перемещения, позволяющее позиционировать источник заряда, зарядочув-

ствительный прибор и объект исследования. Установка работает в режиме сканирующего зонда. При сканировании зонд движется по поверхности образца, измеряя потенциал. Полученные данные обрабатываются компьютером, который строит трехмерную карту потенциала поверхности. Эта карта позволяет выявить дефекты поверхности, такие как трещины, царапины, загрязнения и т.д.

ствительный преобразователь и источники оптического излучения для измерения фотоЭДС на требуемой точке поверхности пластины.

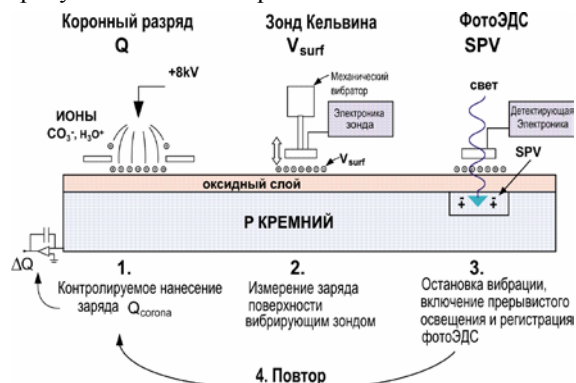


Рисунок 1 – Схема контроля полупроводниковых пластин с использованием методов зондовой электрометрии и воздействия коронным разрядом и светом

Генератор коронного разряда переносит дозированное количество заряда на поверхность подзатворного диэлектрика, формируя таким образом «виртуальный электрод» МОП-конденсатора. Ионы коронного разряда имеют практически нулевую кинетическую энергию при контакте с поверхностью, что исключает повреждение диэлектрика и внедрение ионов в поверхностные слои. Далее заряженный участок поверхности перемещается под зонд Кельвина.

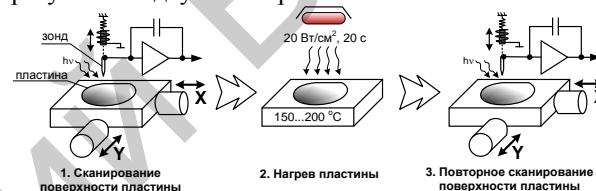
Зарядка поверхности коронным разрядом производится с контролем величины осажденного заряда, что позволяет исследовать зависимость потенциала МОП-структуры от заряда на затворе ( $Q$ - $V$  характеристику) без формирования реального металлического затвора. Результаты такого исследования позволяют выявлять дефекты, формирующие ловушечные уровни на границе раздела, и анализировать их энергетический спектр без разрушающих воздействий на образец.

При остановке колебаний зонда Кельвина и модуляцией сигнала монохроматическим оптическим излучением с различной длиной волны регистрируется фотоЭДС. Это позволяет определять такие параметры полупроводника, как время жизни и длина диффузии неравновесных носителей заряда на границе раздела.

В стадии разработки находится также установка для контроля следов железа и других металлов на поверхности пластин, которые существенно влияют на стабильность полупроводниковой технологии. В основе контроля лежит использование зависимости времени жизни неравновесных носителей заряда от состояния примеси в кристаллической решетке полупроводника. В частности, железо в кремнии  $p$ -типа может находиться в одной из двух форм: в составе пар Fe-V либо в форме интерстициальных

атомов в междоузлиях кристаллической решетки. При комнатной температуре практически все железо в полупроводниковой пластине находится в первой форме, а при температуре порядка 150...200 °С за время ~ 20 секунд переходит во вторую, причем обратный процесс повторного формирования пар Fe-V занимает несколько часов. Это позволяет, на основании соответствующих математических моделей, рассчитать концентрацию примеси железа в выбранной точке образца по изменению времени жизни неравновесных носителей заряда до и после нагрева.

Схема разрабатываемой установки рисунке 2. Контроль осуществляется в три этапа и включает сканирование зондом Кельвина поверхности полупроводниковой пластины, нагрев пластины инфракрасным излучением и повторное сканирование. Распределение следов железа по пластине рассчитывается на основе сопоставления результатов двух сканирований.



$$N_{Fe} = 1,05 \cdot 10^6 \left( \frac{1}{L_{df}} - \frac{1}{L_{ni}} \right) \text{ см}^{-3}$$

Рисунок 2 – Схема контроля примеси железа в кремнии

Помимо железа, возможно выявление следов никеля, меди и некоторых других металлов. Важно отметить, что примеси легких щелочных металлов, таких как Na и K, являющиеся источником подвижного заряда в структуре кремний-диэлектрик, могут быть определены непосредственно по изменению потенциала поверхности полупроводниковой пластины без использования дополнительных воздействий.

В данной работе для визуализации пространственного распределения потенциала использовался зонд Кельвина. Следует отметить, что возможна также реализация предложенного авторами невибрирующего конденсатора, что позволит значительно сократить время сканирования полупроводниковой пластины при повышенной разрешающей способности.

1. The International Technology Roadmap for Semiconductors: 2013 Edition. Metrology: [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.itrs.net/Links/2013ITRS/2013Chapters/2013Metrology.pdf>. – Дата доступа: 13.10.2014 г.
2. Cooper, D. Field Mapping with Nanometer-Scale Resolution for the Next Generation of Electronic

Devices / D. Cooper [et al.] // Nano Lett. – 2011. – V. 11. – P. 4585-4590.

3. Zharin, A.L. Contact Potential Difference Techniques as Probing Tools in Tribology and Sur-

УДК 612.76

## МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АДАПТАЦИИ СИЛОВЫХ ТРЕНАЖЕРОВ К ФИЗИОЛОГИЧЕСКИМ ОСОБЕННОСТЯМ СПОРТСМЕНОВ

Сотский Н.Б.

*Белорусский государственный университет физической культуры  
Минск, Республика Беларусь*

Биомеханика движений человека предполагает логичным представлением двигательного действия, как совокупность трех характеристик или программ. Это – программы места, ориентации и позы. Первая описывает перемещение общего центра масс тела человека, вторая – его ориентацию, как целого в пространстве, а третья – пространственную конфигурацию звеньев тела [1]. Именно эффективное выполнение последней программы обеспечивает выполнение первых двух и, соответственно, всего многообразия двигательных действий человека. Поэтому исследование и контроль позы человека является одной из важнейших задач биомеханики движений человека.

Выделение позы, человека, как самостоятельного объекта исследования, было предложено в работах по механике управляемого тела Г.В. Коренева и известного специалиста по спортивной биомеханике В.Т. Назарова [2,3]. В последующих работах была предложена и успешно адаптирована методика записи и исследования позы и ее изменений в процессе выполнения двигательных действий [1]. Предложенные способы были удобны при практическом исследовании плоскостных движений человека, в которых было задействовано минимальное количество степеней свободы опорно-двигательного аппарата. Анализ изменения позы при выполнении более сложных пространственных движений наталкивался на ряд проблем, связанных с учетом двух или трех анатомических движений, одновременно выполняемых в одном и том же суставе.

В недавно вышедшей нашей работе [4] было предложено и проиллюстрировано решение данной проблемы. Его суть в установлении соответствия суставных углов анатомических движений (сгибательно-разгибательных, ротаций и циркумдукций) углам Эйлера, образованным системами координат, жестко связанными с каждым из сочлененных в суставе звеньев тела. При таком подходе стало возможным анализировать практически любые изменения позы человека вообще и в частности, при выполнении спортивных движений.

face Mapping // Applied Scanning Probe Methods. – 2010. – V. 14. – P. 687-720.

В дальнейшем нами было проведено исследование изменения позы при выполнении силовых упражнений с использованием стационарных тренажеров с целью адаптации тренировки к реальным анатомическим и физиологическим режимам работы мышц человека [5]. В ходе анализа были рассмотрены упражнения на стационарных тренажерах известной фирмы PRESSOR [6]. Поза и ее изменения определялись, для идеального варианта упражнения, рекомендованного производителем.

Пример исследования изменения позы при выполнении силового упражнения приведен на рисунке 1



Рисунок 1 – Пример изменения позы во время выполнения упражнения

Закон изменения позы при выполнении данного упражнения, в соответствии с разработанной методикой, может быть представлен в матричном виде, где строки обозначают биокинематические цепи (ноги, руки, позвоночник), столбцы – суставы, индексы 1,2 и 3 соответствуют анатомическому типу суставного движения, а в ячейках записаны суставные углы:

$\Phi_{ij1} =$	0	180	0	0
	0	180	0	0
	180	0	0	0
	180	0	0	0
	0	0	0	0