

Литература

1. Распопов В.Я., Малютин Д.М. Измерительные приборы и системы для ориентации, стабилизации и управления / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 4. – С. 372–386.

2. Малютин Д.М., Телухин С.В., Распопов В.Я. Гиросtabilизаторы оптической аппаратуры / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – № 10. – С. 290–300.

3. Распопов В.Я., Алалуев Р.В., Иванов Ю.В., Малютин Д.М. Информационно – измерительная и управляющая система многооборотного электропривода трубопроводной арматуры / Приборы и методы измерений. – 2011. – № 2 (3). – С. 33–40.

4. Алалуев Р.В., Малютин Д.М., Плясов А.В., Распопов В.Я., Сидоров П.Г. Испытания многообо-

ротного электропривода для управления, регулирования и мониторинга запорной арматуры магистралей трубопроводного транспорта / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2012. – № 12-1. – С. 77–88.

5. Дмитриев А.В., Кухарь В.Д., Распопов В.Я., Малютин Д.М., Рогов С.В., Родионов В.И. Электропривод для управления потоками рабочей среды. Патент на полезную модель RU112973 U1, 27.01.2012.

6. Малютин Д.М. Конструкции многооборотных электроприводов трубопроводной арматуры: учебное пособие / Тула : Изд-во ТулГУ, 2014. – 121 с.

7. Горлов В.Ф., Дмитриев В.А., Распопов В.Я. Завод и кафедра / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – № 9–2. – С. 274–284.

УДК 621.382

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ КОНТРОЛЕ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ Жарин А.Л.¹, Петлицкий А.Н.², Пилипенко В.А.², Тявловский А.К.¹, Тявловский К.Л.¹, Гусев О.К.¹, Воробей Р.И.¹, Пантелеев К.В.¹

¹Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

²ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
Минск, Республика Беларусь

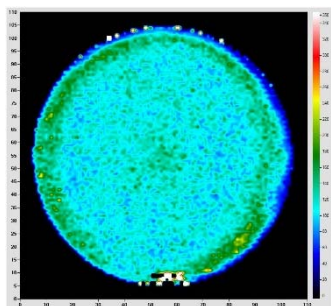
Большинство традиционных методов технологического контроля полупроводниковых пластин, используемых в производстве изделий микроэлектроники, связаны с использованием разрушающих воздействий либо требуют создания непосредственного контакта с поверхностью образца, что делает последний непригодным для дальнейшего использования в технологическом процессе. В связи с этим в таких исследованиях используются, как правило, пластины-спутники, что исключает возможность сплошного входного, а также промежуточного, контроля исходных пластин и формируемых структур. Методы зондовой электрометрии, основанные на бесконтактной регистрации поверхностного электрического потенциала (контактной разности потенциалов), выгодно отличаются отсутствием какого-либо повреждающего воздействия на поверхность образца. Реализация данных методов в режиме сканирования обеспечивает не только выявление, но и точную локализацию мест расположения дефектов поверхности. Для уточнения физической природы дефектов электрометрические измерения могут быть дополнены неразрушающими воздействиями на поверхность, в частности, освещением монохроматическим или белым светом, нагревом инфракрасным излучением и др.

В частности, различные режимы сканирующих зондовых электрометрических измерений с дополнительными неразрушающими воздей-

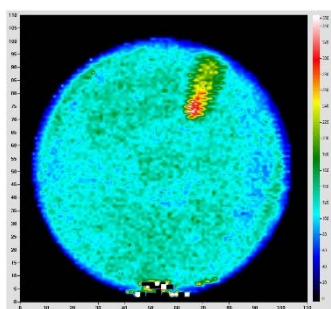
ствиями на поверхность полупроводниковой пластины реализованы в серии измерительных установок СКАН (СКАН-2013, СКАН-2015, СКАН-2019), созданных в НИЛ полупроводниковой техники Белорусского национального технического университета. Данные установки нашли применение при выявлении и исследовании дефектов поверхности полупроводниковых пластин в условиях реального производства.

Непосредственно регистрируемая средствами зондовой электрометрии контактная разность потенциалов (КРП) является комплексным параметром, зависящим от большого количества факторов. Вследствие этого визуализация пространственного распределения КРП, обеспечиваемая в установках серии СКАН как базовая функция, позволяет выявлять дефекты поверхности полупроводниковой пластины, но не характеризовать их физическую природу. Для анализа дефектов, связанных с изменениями длины диффузии неосновных носителей заряда (ННЗ) в кремнии измерения могут выполняться в режиме исследования поверхностной фотоЭДС на нескольких (не менее двух) длинах волн оптического излучения. Реализация данного режима в установках СКАН обеспечивает не только качественное, но и количественное определение длины диффузии ННЗ с визуализацией её пространственного распределения по всей поверхности пластины с высоким пространственным разрешением (не хуже

0,5 мм). На рисунке 1 приведены полученные методом сканирующей фотоЭДС визуализированные изображения пространственного распределения длины диффузии ННЗ двух исходных пластины: бездефектной (вверху) и имеющей дефект поверхности (внизу). На втором изображении четко просматривается расположение дефекта, определены его количественные параметры (значения длины диффузии ННЗ в области дефекта).



а



б

Рисунок 1 – Визуализированные изображения пространственного распределения длины диффузии ННЗ бездефектной полупроводниковой пластины (а) и пластины с дефектом (б), полученные методом сканирующей зондовой электрометрии

Следует отметить, что измерения в режиме сканирующей фотоЭДС и визуализация их результатов выполняются в реальном масштабе времени, что позволяет использовать данный режим установок СКАН для целей межоперационного контроля технологических процессов производства изделий микроэлектроники.

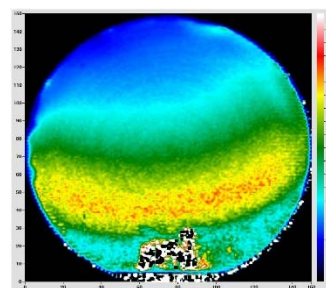
Дефекты полупроводниковых пластин, возникающие непосредственно в процессе производства, в значительном количестве случаев связаны с загрязнением поверхности нежелательными примесями, из которых наибольшее значение имеет примесь железа. Анализ распределения данной примеси по поверхности пластины после различных технологических операций может способствовать выявлению источника примеси, а также позволяет оценить пригодность пластины для изготовления полупроводниковых структур. Для выполнения такого анализа конструкция измерительной установки СКАН-2015 предусмотрен специальный режим работы, при котором исследование проводится в несколько этапов:

1. Регистрируется пространственное распределение длины диффузии ННЗ в режиме сканирующей фотоЭДС.

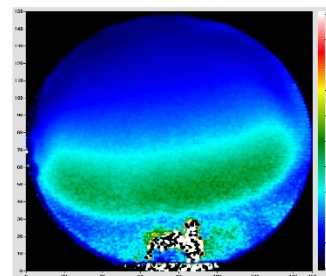
2. Осуществляется нагрев пластины длинноволновым инфракрасным излучением до температуры 200 °С и выдержка при такой температуре в течение 15 минут. Такой нагрев приводит к обратимому распаду пар Fe-B с выделением интерстициального железа, но не оказывает влияния на сформированные приборные структуры и потому относится к неразрушающим воздействиям.

3. Выполняется повторная регистрация пространственного распределения длины диффузии ННЗ в режиме сканирующей фотоЭДС.

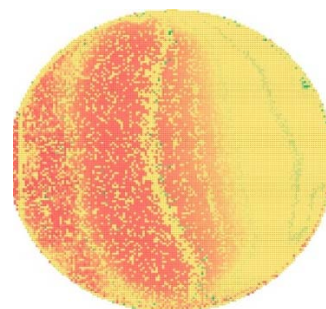
4. Концентрация примеси железа в кремнии рассчитывается на основании значений длины диффузии ННЗ в кремнии до и после нагрева в каждой точке поверхности полупроводниковой пластины в соответствии с математическими моделями влияния пар Fe-B и интерстициального железа на длину диффузии ННЗ.



а



б



в

Рисунок 2 – Визуализация пространственного распределения примеси железа в кремнии для пластины-спутника диаметром 150 мм

Все перечисленные этапы измерений полностью автоматизированы, а расчет концентрации

примеси железа выполняется компьютерными средствами с использованием специально разработанного программного обеспечения. Следует отметить, что вследствие многоэтапности и большого объема выполняемых вычислений, а также необходимости длительной (около 24 ч) выдержки исследованных пластин при комнатной температуре для их возврата к исходному состоянию, соответствующему восстановлению пар Fe-B, такие измерения не относятся к исследованиям в реальном времени.

На рисунке 2 приведен пример исследования пространственного распределения примеси железа по поверхности полупроводниковой пластины-

спутника *p*-Si диаметром 150 мм без гетера с толщиной окисла 1000Å. На рисунке 2, *а* показано распределение длины диффузии ННЗ по поверхности пластины до нагрева, на рисунке 2, *б* – после нагрева. Визуализированные с использованием условных цветов результаты расчета концентрации железа в кремнии показаны на рисунке 2, *в*.

Полученные результаты подтверждают высокую эффективность методов зондовой электротметрии в условиях реального производства и перспективность их использования во входном и межоперационном контроле технологических процессов изготовления изделий микроэлектроники.

УДК 531.385

СИСТЕМА КОРРЕКЦИИ ГИРОСТАБИЛИЗАТОРА ГРАВИМЕТРА С ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИЕЙ СИГНАЛА ПЕРВОГО ИНТЕГРАТОРА

Малютин Д.М.

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
Тула, Российская Федерация

Задача повышения точности гравиметрических измерений является актуальной [1–3]. Уровень точности применяемой аппаратуры для целей разведки месторождений углеводородного сырья должен обеспечивать уверенное обнаружение аномалий с амплитудой 0,1–0,2 мГал, в то время как средняя квадратическая погрешность измерений, присущая гравиметрическим комплексам, созданным в России и за рубежом, составляет 0,1–0,3 мГал. Обеспечение перспективной точности возможно при проведении работ, связанных с совершенствованием системы стабилизации, гравиметрического датчика, увеличением точности обработки гравиметрической информации, методики проведения гравиметрической съемки, увеличением точности навигационной информации о параметрах движения объекта-носителя.

Совершенствование системы стабилизации морского гравиметра возможно не только за счет совершенствования чувствительных элементов [4], но и за счет придания системе стабилизации новых свойств приспособляемости к заранее непредвиденным изменениям условий работы путем автоматического изменения своих свойств и параметров. Инерциальная система стабилизации не возмущается параметрами движения носителя. Недостатком такого устройства является то, что ошибки начальной выставки, возмущающие моменты в осях подвеса гироскопа и другие факторы приводят к незатухающим и даже расходящимся колебаниям гиростабилизированной площадки с периодом Шулера относительно вертикали.

Рассмотрим устройство системы коррекции двухосной системы стабилизации (гировертикали), позволяющее обеспечить одновременно отсутствие ошибок удержания вертикали даже при ускоренном движении носителя и демпфирование собственных колебаний инерциальной гировертикали. На рисунке 1 показана функциональная схема коррекции двухосной гировертикали с параметрической коррекцией сигнала первого интегратора [5].

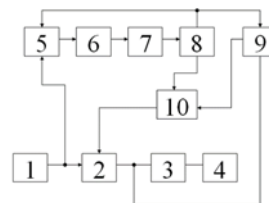


Рисунок 1 – Функциональная схема системы коррекции двухосной гировертикали

На рисунке 2 показана структурная схема системы коррекции двухосной гировертикали с параметрической коррекцией сигнала первого интегратора.

Работа прибора происходит следующим образом. Сигнал с выхода акселерометра 1, пропорциональный ускорению движения транспортного средства по отношению к Земле, подается на вход интегратора 2, с выхода которого сигнал поступает на усилитель 3 и далее на датчик момента гироскопа 4, что обеспечивает удержание в горизонте стабилизируемой площадки, с которой связана неподвижная опорная система координат.