

ление набегающего потока отбиралось в нужных точках по площади фронтальной решетки кондиционера, передавалось на датчики давления и регистрировалось измерительной системой.

Обработка результатов измерений распределения давления набегающего потока воздуха позволила отметить существенное изменение картины обтекания, которое вносит установка спойлера на кабине автомобиля. На основании измерений полей давлений набегающего потока были выработаны рекомендации по изменению геометрии спойлера.

Описанная выше информационно - измерительная система была внедрена на Минском автомобильном заводе, неоднократно применялась

УДК 537.58:621.891

### АЛГОРИТМ НЕРАЗРУШАЮЩИХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИМЕСИ ЖЕЛЕЗА В КРЕМНИИ

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

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

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

В соответствии с современными требованиями, допускаемые значения концентрации посторонних примесей в полупроводниковой пластине не должны превышать  $10^9$  атомов/см<sup>3</sup>. Наиболее значимыми примесями, значительно ухудшающими характеристики полупроводниковых устройств, являются железо и никель. Их источником в большинстве случаев являются трущиеся поверхности элементов технологического оборудования, изготовленных из стали.

Преимущества разрабатываемой методики контроля примеси железа в кремнии на основе методов зондовой электрометрии заключаются в высокой чувствительности, отсутствии необходимости подготовки поверхности перед контролем либо создания особых условий для образца (в частности, вакуумирования), возможности регистрации пространственного распределения примеси железа (построения карты распределения примеси по поверхности пластины), отсутствии разрушающих воздействий на образец, что позволяет после контроля вернуть пластину в технологический процесс. В основу методики положено двукратное измерение распределения времени жизни или длины диффузии неравновесных носителей заряда (ННЗ) в кремнии в сочетании с воздействием на пластину инфракрасным излучением между двумя измерениями. Атомы железа в кремнии *p*-типа создают связи с легирующим бором, а поскольку концентрация последнего многократно превышает возможные значения концентрации примеси железа, практически все железо в кремнии присутствует в виде пар Fe-B. Воздействие инфракрасным излучением обеспечивает нагрев кремниевой пластины

для натуральных исследований аэродинамических характеристик транспортных средств и показала себя как весьма надежное и удобное средство для количественных и качественных натуральных исследований особенностей аэродинамики обтекания набегающим потоком воздуха навесного оборудования кабины или кузова транспортных средств.

1. Евграфов А.Н., Высоцкий М.С., Титович А.И. Аэродинамика магистральных автопоездов, - Мн.: Наука и техника, 1988. - 232с.
2. Евграфов А.Н., Высоцкий М.С. Аэродинамика колесного транспорта. - Мн.: НИРУП «Белавтотракторостроение», 2001. -308с.

до температуры 200 °С, что недостаточно для повреждения полупроводниковых структур, но в то же время приводит к разрушению связей Fe-B и выделению интерстициального железа Fe<sub>i</sub>, отслеживаемому по изменению длины диффузии ННЗ. Аналогичным образом происходит связывание и выделение примеси никеля.

Схема алгоритма методики определения примеси железа в кремнии с использованием дополнительного воздействия инфракрасным излучением показана на рисунке 1. Алгоритм предусматривает измерение длины диффузии ННЗ в выбранных точках поверхности в режиме сканирования пластины электрометрическим зондом (блок 1). Поскольку такие измерения требуют сравнительно длительного времени (порядка 10 с для каждой точки), выбор количества анализируемых точек должен производиться на основе компромисса между разрешающей способностью и длительностью проведения контроля. Используемая методика измерения длины диффузии является бесконтактной и основана на регистрации изменений потенциала поверхности полупроводника с помощью электрометрического зонда Кельвина при воздействии на нее монохроматическим оптическим излучением разных длин волн [1]. Результатом выполнения блока 1 алгоритма является карта распределения длины диффузии ННЗ по поверхности пластины, обусловленного влиянием пар Fe-B.

После первичного картографирования пластины осуществляется ее перенос в камеру нагрева (блок 2), где производится ее прогрев при температуре 200 °С в течение 2 минут (блок 3). Имеющиеся литературные данные [2] пока-

зывают, что такая выдержка достаточна для полной диссоциации пар Fe-B. В качестве источника нагрева в разрабатываемой методике предлагается использовать мощные галогенные лампы. Поскольку методика расчета такого рода оптических нагревателей в настоящее время проработана недостаточно, для разработки методики нагрева полупроводниковой пластины, обеспечивающей необходимую интенсивность и равномерность воздействия, были выполнены экспериментальные исследования с использованием макета нагревательного устройства и реальной полупроводниковой пластины из кремния *p*-типа диаметром 200 мм. В качестве источников оптического излучения в эксперименте использовались линейные галогенные лампы КГ-220-500, максимальная суммарная мощность нагревателя достигала 2 кВт. Равномерность воздействия обеспечивалась размещением ламп в специально изготовленной арматуре с полированным металлическим рефлектором. Для регулировки мощности нагревателя использовался блок управления симисторами и тиристорами БУСТ-2 производства фирмы ОВЕН (Россия). Полупроводниковая пластина в эксперименте располагалась на расстоянии 5 см от нагревательной арматуры. Температура тыльной стороны пластины измерялась контактным термометром на основе термопары ХК (хромель-копель), температура лицевой (непосредственно подвергающейся нагреву) стороны – инфракрасным пирометром.

По результатам исследований было определено, что для нагрева кремниевой пластины диаметром 200 мм до температуры 180 °С за время не более 60 с достаточно установленной мощности нагрева 1 кВт. Более высокие значения установленной мощности приводят к повышенному градиенту температуры по толщине пластины, что не отвечает требуемым условиям воздействия и создает риск возникновения термических напряжений в пластине, способствующих росту дефектов кристаллической решетки. Результаты экспериментов показали также высокую чувствительность температуры полупроводниковой пластины к изменениям мощности оптического излучения, что указывает на необходимость использования отрицательной обратной связи по температуре для управления источником нагрева.

Интенсивный процесс повторного связывания интерстициального железа в пары Fe-B начинается спустя 2 ч после охлаждения пластины [2], вследствие чего все последующие операции алгоритма должны выполняться в пределах этого интервала времени. Следует отметить, что повышение температуры приводит к резкому сокращению времени повторного формирования пар Fe-B – так, при 80 °С данный процесс начинается уже спустя 200 с после отжига, что указы-

вает на недопустимость нагрева образцов после диссоциации пар Fe-B во время контроля.

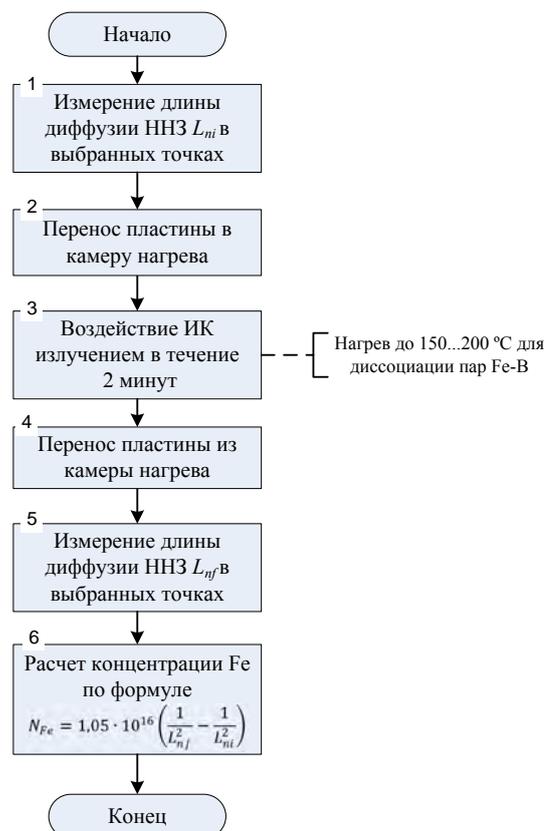


Рисунок 1 – Схема алгоритма методики определения примеси железа в кремнии

Перенос пластины из камеры нагрева (блок 4) может производиться с произвольной скоростью, однако обязательным условием является точность позиционирования пластины при выполнении повторных измерений распределения длины диффузии ННЗ (блок 5). Это связано с тем, что для использования в расчетной математической модели необходимы данные об изменении длины диффузии ННЗ при диссоциации пар Fe-B в одних и тех же точках поверхности образца. Наилучшим образом данное условие может быть обеспечено при использовании одной установки пластины на держателе на всех основных этапах алгоритма (первичном измерении распределения длины диффузии ННЗ, нагреве, повторном измерении длины диффузии ННЗ). Это требует объединения средств измерений (сканирующего электрометрического зонда Кельвина) и камеры нагрева в одной измерительной установке, при этом желательно объединения механизма сканирования с механизмом перемещения образца в камеру нагрева, что обеспечит однозначность позиционирования образца при первичном и повторном сканировании.

Концентрация железа в каждой из точек исследования рассчитывается на основании полу-

ченной в результате теоретических исследований математической модели, выражающей в виде расчетной формулы (блок б)

$$N_{Fe} = 1,05 \cdot 10^{16} \left( \frac{1}{L_{nf}^2} - \frac{1}{L_{ni}^2} \right),$$

где  $L_{ni}$  и  $L_{nf}$  – длина диффузии ННЗ до и после нагрева, соответственно.

Результатом выполнения указанных действий является карта распределения примеси железа в кремнии, получаемая с использованием только бесконтактных методов и средств измерений. Разработанный алгоритм реализуется в кон-

УДК 537.58:621.891

## ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН СКАН-2013

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

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

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

Разработка измерительной системы для контроля полупроводниковых пластин СКАН-2013 проводилась в НИЛ полупроводниковой техники БНТУ в рамках исследований по созданию новых средств неразрушающего контроля для микроэлектронной промышленности.

Конструктивно система состоит из двух основных блоков:

- сканирующей системы (рисунок 1);
- персонального компьютера с установленным специализированным программным обеспечением SCAN2013.



Рисунок 1 – Сканирующая система установки

СКАН-2013 обеспечивает неразрушающую бесконтактную характеристику пластин со структурой кремний-диэлектрик диаметром до 200 мм с помощью коронного разряда и регистрации потенциала поверхности в процессе

структуры и программном обеспечении измерительной установки для характеристики полупроводниковых пластин со структурой кремний-диэлектрик, разрабатываемой в НИЛ полупроводниковой техники БНТУ.

1. Zoth, G. A fast, preparationfree method to detect iron in silicon / G. Zoth, W. Bergholz // J. Appl. Phys. – 1990. – V. 67. – P. 6764.
2. Choi, B.-D. Latent Iron in Silicon / B.-D. Choi, D.K. Schroder, S. Kolesnikov, S. Mahajan // Jpn. J. Appl. Phys. – 2001. – V. 40. – P. L915-L917.

двухкоординатного сканирования поверхности пластины. Принцип работы системы заключается в бесконтактной регистрации пространственного распределения электрического потенциала поверхности полупроводниковой пластины по методу Кельвина-Зисмана. Результаты регистрации отображаются в виде в виде цветовой топограммы, где значение измеренного потенциала отображается условным цветом. Измерения проводятся при нормальных условиях и не связаны с разрушающими воздействиями на контролируемую пластину. Предварительной подготовки поверхности пластины (травления, металлизации и т.д.) также не требуется, что позволяет выполнять контроль образцов, взятых непосредственно из технологического процесса.

Воздействие коронным разрядом на поверхность окисленной полупроводниковой пластины позволяет выявлять места с повышенной концентрацией дефектов (ловушечных уровней) на границе раздела кремний-диэлектрик. Электрический заряд, осаждаемый на поверхность диэлектрика, формирует с полупроводником подобие МОП-структуры. «Затвор» структуры создается ионами  $H_3O^+$  или  $CO_3^-$  в зависимости от знака разряда. Регулирование дозы воздействия коронным разрядом с измерением электрического потенциала поверхности после каждого цикла воздействия с помощью бесконтактного зонда Кельвина позволяет получить отсчеты  $Q-V$  характеристики структуры для анализа энергетических уровней дефектов, а анализ изменения распределения заряда на поверхности пластины во времени обеспечивает выявление областей с повышенными токами утечки диэлектрика.

Напряжение коронного разряда составляет 9 кВ, что гарантирует отсутствие ударных по-