

личин с расчетными. Дополнительные возможности также вытекают из способности измерять ток нулевого провода и проводить измерения на постоянном и пульсирующем токе, что важно при изучении нелинейных цепей и устройств. Индикация результатов измерений на дисплее содержит обозначение размерностей, что весьма важно для учебных целей.

#### Литература

1. Общая электротехника: методические указания к лабораторному практикуму / В. А. Толмачев [и др.] – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 71 с.
2. Комплект измерительный К505. Техническое описание. ООО «Приборостроительная компания «Высоковольтные технологии». – г. Волгоград. – 2018.

УДК 621.382

### ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ ТУННЕЛЬНОГО ОКИСЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ

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>, Гусев О.К.<sup>1</sup>, Воробей Р.И.<sup>1</sup>, Пантелеев К.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет  
<sup>2</sup>ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»  
Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** Рассмотрено применение установки фотостимулированной сканирующей зондовой электрометрии для выявления дефектов ионно-легированных и диффузионных слоев полупроводниковой пластины после операции туннельного окисления, выполненной в различных технологических режимах. Измерения в двух режимах (измерения контактной разности потенциалов и визуализации длины диффузии неравновесных носителей заряда) являются взаимодополняющими, позволяя выявлять различные виды дефектов на одной и той же поверхности.

**Ключевые слова:** зондовая электрометрия, полупроводниковая пластина, окисел, дефект.

### CHARACTERISATION OF TUNNELING OXIDATION TECHNOLOGICAL PROCESS USING SCANNING PROBE ELECTROMETRY TECHNIQUE

Zharin A.<sup>1</sup>, Petlitsky A.<sup>2</sup>, Pilipenko V.<sup>2</sup>, Tyavlovsky A.<sup>1</sup>, Tyavlovsky K.<sup>1</sup>, Gusev O.<sup>1</sup>, Vorobey R.<sup>1</sup>, Pantišaleyeu K.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Belarusian National Technical University  
<sup>2</sup>JSC "INTEGRAL" – Holding Management Company  
Minsk, Republic of Belarus

**Abstract.** A photostimulated scanning probe electrometry device was applied for detecting defects in ion-doped and diffusion layers of a semiconductor wafer after the operation of tunnel oxidation performed in various technological modes. Two modes of measurement (contact potential difference measurements and visualisation of diffusion length of nonequilibrium charge carriers) are shown to be complementary allowing to detect different types of defects on the same wafer.

**Key words:** probe electrometry, semiconductor wafer, oxide, defect.

Адрес для переписки: Тявловский А.К., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь  
e-mail: tyavlovsky@bntu.by

Характеризация дефектов ионно-легированных и диффузионных слоев полупроводниковых пластин требует исключительно высокой поверхностной чувствительности метода контроля, что связано с малой толщиной (как правило, менее 1 мкм) таких слоев. Особый интерес представляет выполнение такой характеристики на различных стадиях технологического процесса для пластин с уже сформированными приборными структурами, что позволяет выполнить оценку качества и определить пути совершенствования самого технологического процесса. Используемый метод контроля должен обеспечивать визуализацию пространственного распределения электрофизических

параметров поверхности для анализа степени выраженности дефектов и их возможного источника. Методика измерений предпочтительно должна быть бесконтактной, обеспечивая возможность возвращения контролируемых пластин в технологический процесс.

Для решения этой задачи в НИЛ полупроводниковой техники БНТУ был разработан комплекс методов и средств неразрушающей бесконтактной характеристики полупроводниковых пластин диаметром до 200 мм на основе методов зондовой электрометрии, основные элементы которого к настоящему времени внедрены на ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания

холдинга «ИНТЕГРАЛ» [1]. В качестве базового метода измерений используется метод сканирующего зонда Кельвина, отличающийся высокой поверхностной чувствительностью, поскольку формирование измерительного сигнала происходит в пределах Дебаевской длины экранирования, существенно меньшей типичной толщины ионно-легированных и диффузионных слоев. В то же время, для диэлектриков Дебаевская длина экранирования существенно больше типичной толщины окисла, выращиваемого на полупроводниковых пластинах в технологическом процессе окисления их поверхности, что позволяет использовать метод для контроля дефектов ионно-легированных и диффузионных слоев, формирующихся в процессе окисления.

В частности, с использованием входящей в состав комплекса измерительной установки фотостимулированной сканирующей зондовой электротометрии СКАН-2015 были выполнены исследования процессов получения туннельного окисла на поверхности полупроводниковой пластины различными технологическими методами. Объектом являлись пластины-спутники Дюна 1990 диаметром 200 мм, на которых до проведения операции окисления были сформированы приборные структуры (рис. 1).

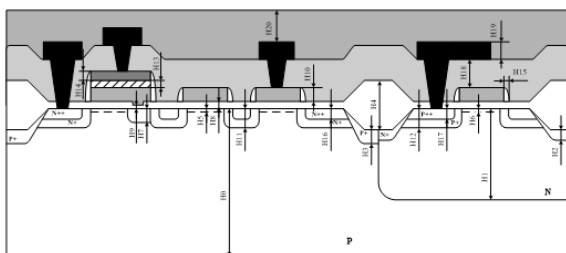


Рисунок 1 – Сформированные на пластине-спутнике приборные структуры

Формирование окисла осуществлялось в трех различных технологических режимах:

- 1) пирогенным окислением при температуре 800 °С;
- 2) туннельным окислением (сухим) при температуре 900 °С;
- 3) туннельным окислением на установке БТО при температуре 900 °С с выполнением 7 циклов окисления.

Во всех случаях для анализа дефектов поверхности, формируемых в результате операции окисления, исследования с помощью установки СКАН-2015 были выполнены в 2 режимах:

- 1) режим измерения контактной разности потенциалов (КРП), позволяющий визуализировать картину пространственного распределения относительных значений работы выхода электрона (РВЭ) поверхности полупроводника;
- 2) режим фотостимулированной сканирующей электротометрии с визуализацией простран-

ственного распределения длины диффузии неравновесных носителей заряда (ННЗ) в поверхностном слое.

Результаты визуализации дефектов ионно-легированных и диффузионных слоев пластины-спутников в указанных режимах приведены на рис. 2–4.

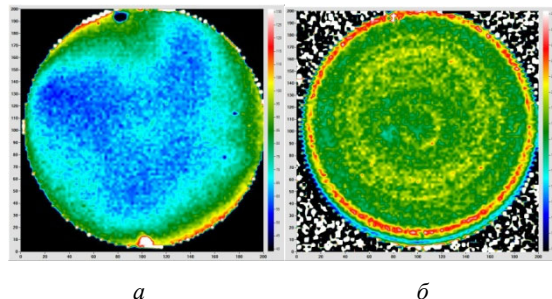


Рисунок 2 – Распределение КРП (а) и длины диффузии ННЗ (б) пластины-спутника Дюна 1990 после пирогенного окисления при 800 °С

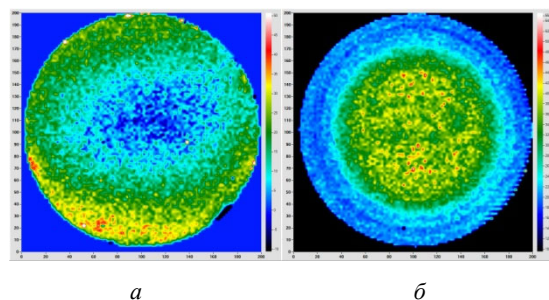


Рисунок 3 – Распределение КРП (а) и длины диффузии ННЗ (б) пластины-спутника Дюна 1990 после сухого туннельного окисления при 900 °С

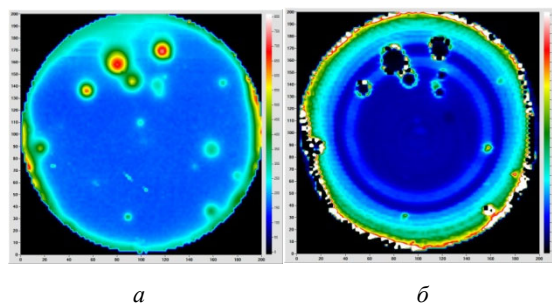


Рисунок 4 – Распределение КРП (а) и длины диффузии ННЗ (б) пластины-спутника Дюна 1990 после 7 циклов окисления на установке БТО при 800 °С

Можно видеть, что каждый из перечисленных технологических процессов дает свою характерную картину распределения дефектов. Обращает на себя внимание различие визуализированных карт распределения дефектов, полученных в режиме измерения КРП и длины диффузии ННЗ. Это объясняется тем, что РВЭ поверхности и, соответственно, прямо связанная с ней КРП, является комплексным параметром, отражающим в первую очередь неоднородности кристалличе-

ской структуры и химического состава поверхности, в частности, дислокации кристаллической решетки. Наличие дислокаций может приводить к уменьшению времени жизни ННЗ, регистрируемому в режиме фотостимулированной электрометрии. В то же время, такое уменьшение может являться и следствием, формирования ловушечных уровней, не связанных с явно выраженными дислокациями или другими структурными дефектами. Таким образом, измерения в обоих режимах (КРП и визуализации длины диффузии ННЗ) яв-

ляются взаимодополняющими, позволяя выявлять различные виды дефектов на одной и той же поверхности.

#### Литература

1. Зондовые зарядочувствительные методы в технологическом контроле производства больших интегральных схем / К. Л. Тявловский [и др.] // Материалы и структуры современной электроники: сб. науч. тр. IX Междунар. науч. конф., Минск, 14–16 окт. 2020 г. / редкол.: В.Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2020. – С. 129–132.

УДК 681.5

### СИНТЕЗ НЕЙРОСЕТЕВОГО УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ С ЗОНОЙ НЕЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Козырь А.В., Феofilов С.В.

*ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»,  
Лаборатория цифровых систем управления сложными динамическими объектами  
Тула, Российская Федерация*

**Аннотация.** Автономные электрогидравлические приводы находят широкое применение в промышленных приложениях, таких как мобильные манипуляторы, роботизированный экзоскелет, аэрокосмические приложения. Такие системы имеют ряд существенных преимуществ по отношению к электроприводу, высокое соотношение развиваемого усилия к весу привода, компактные размеры автономного привода обеспечиваются интегрированной компоновкой всех элементов электрогидравлической системы. Однако управление такими системами значительно усложняется наличием существенных нелинейностей в объекте управления, таких как мертвая зона, что затрудняет реализацию системы управления классическими регуляторами. В этой работе проектируется регулятор с компенсационным нейросетевым управлением для объектов с зоной нечувствительности. С помощью метода Ляпунова доказывается устойчивость замкнутой системы. Приводятся результаты численного моделирования для демонстрации эффективности предложенных подходов.

**Ключевые слова:** автономный электрогидравлический привод, зона нечувствительности, нейросетевой регулятор, компенсация нелинейности, синтез системы управления.

### SYNTHESIS OF NEURAL NETWORK CONTROL OF AN AUTONOMOUS ELECTRO-HYDRAULIC SYSTEMS WITH A DEAD-ZONE

Kozyr A., Feofilov S.

*Tula State University  
Tula, Russian Federation*

**Abstract.** Autonomous electro-hydraulic drives are widely used in industrial applications, such as mobile manipulators, robotic exoskeletons, aerospace applications. Such systems have a number of significant advantages in relation to the electric drive, the high ratio of the developed force to the weight of the drive, the compact size of the autonomous drive is provided by the integrated layout of all elements of the electrohydraulic drive. However, the management of such systems is significantly complicated by the presence of significant nonlinearities in the control object, such as a dead zone, which makes it difficult to implement a control system with classical regulators. In this work, a controller with compensatory neural network control is designed for objects with a dead zone. Using the Lyapunov method, the stability of a closed system is proved. The results of numerical modelling are presented to demonstrate the effectiveness of the proposed approaches.

**Key words:** Autonomous electro-hydraulic actuator, dead zone, neural network controller, non-linearity compensation, control system synthesis.

*Адрес для переписки: Козырь А.В., пр. Ленина, 92, Тула 300012, Российская Федерация  
e-mail: Kozyr\_A\_V@mail.ru*

Электрогидравлические приводы используются в различных отраслях промышленности и часто являются наиболее подходящим вариантом

для систем, где требуется развивать большие усилия с высоким быстродействием. Важным преимуществом гидравлического привода является спо-