

Далее проводили контроль функционирования полученных структур. Результаты анализа контроля функционирования токопроводящих структур в таблице показали, что предлагаемая технология изготовления многослойной системы металлизации ИС обеспечивает повышение выхода годных приборов за счет повышения качества токопроводящей пленки сплава Al+1% Si.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При травлении пленки сплава на основе алюминия в плазме газовой смеси  $\text{BCl}_3$ ,  $\text{Cl}_2$  и  $\text{N}_2$  при давлении 150–250 мТорр, плотности мощности 1,6–2,2 Вт/см<sup>2</sup> при следующем содержании компонентов, об. %:  $\text{BCl}_3$  50–65;  $\text{Cl}_2$  25–35;  $\text{N}_2$  – остальное, происходит формирование поперечного профиля токоведущих дорожек в форме равнобоковой трапеции с углами при нижнем основании, равными 75–85°. Это приводит к устранению эффекта экранирования при последующем осаждении диэлектрика, предотвращению его преимущественного роста в верхней части канавок между дорожками и полному заполнению углублений топологического рельефа материалом диэлектрика и далее материалом последующего слоя.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Григорьев, Ф.И. Плазмохимическое и ионное химическое травление в технологии микроэлектроники. М.: МГИЭИМ. –2003. – 48 с.
2. Турцевич, А.С. Формирование из газовой фазы функциональных слоев интегральных микросхем / А.С. Турцевич, В.А. Емельянов. – Минск: Интегралполиграф, 2007. – 224 с.

## КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПРИБОРНЫХ СТРУКТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ СКАН-2019

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

---

<sup>1)</sup> *Белорусский национальный технический университет, пр. Независимости, 65, 220013 Минск, Беларусь, e-mail: nil\_pt@bntu.by*

<sup>2)</sup> *ОАО «ИНТЕГРАЛ» - управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», ул. Казинца, 121А, 220108 Минск, Беларусь, e-mail: office@bms.by*

Для комплексного контроля и визуализации пространственного распределения дефектов полупроводниковой пластины разработана измерительная установка сканирующей зондовой электрометрии, реализующая режимы сканирующего зонда Кельвина (SKP), поверхностной фотоЭДС (SPV) и барьерной фотоЭДС (JPV). Повторный контроль поверхности рабочих пластин на разных стадиях технологического процесса с использованием нескольких режимов измерения обеспечивает определение типа дефектов и их потенциального источника в технологическом процессе.

**Ключевые слова:** полупроводниковая пластина; дефект; сканирующий зонд Кельвина; поверхностная фотоЭДС; визуализация.

# QUALITY CONTROL OF SEMICONDUCTOR MATERIALS AND STRUCTURES USING THE SCAN-2019 MEASURING INSTALLATION

A. L. Zharin<sup>1</sup>, A. K. Tyavlovsky<sup>1</sup>, K. L. Tyavlovsky<sup>1</sup>, R. I. Vorobey<sup>1</sup>,  
K. U. Pantsialeyeu<sup>1</sup>, V. A. Mikitsevich<sup>1</sup>, V. A. Pilipenko<sup>2</sup>, A. N. Petlitsky<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Belarusian National Technical University, Nezavisimosti Av. 65, 220013 Minsk, Belarus

<sup>2</sup>JSC "INTEGRAL" – Holding Management Company, Kazintsa str., 121A,  
220108 Minsk, Belarus

Corresponding author: A. K. Tyavlovsky (tyavlovsky@bntu.by)

To provide complex quality control and visualization of surface defects in a semiconductor wafer, a measuring installation for scanning probe electrometry has been developed. The installation implements three modes of operation including scanning Kelvin probe (SKP), surface photovoltage (SPV) and junction photovoltage (JPV) mode. Repeated control of the same wafer at different stages of the technological process using several measurement modes assures determination of defect types and their potential source in the technological process.

**Key words:** semiconductor wafer; defect; scanning Kelvin probe; surface photovoltage; visualization.

## ВВЕДЕНИЕ

Как отмечается в Перспективном плане *International Roadmap for Devices and Systems* [1], по состоянию на 2021 г. одним из основных ограничений, препятствующих повышению выхода годных изделий при производстве больших интегральных схем, является недостаточная чувствительность существующих методов неразрушающего контроля, не обеспечивающая выявление дефектов поверхностей полупроводниковых материалов и структур с требуемой достоверностью. При этом должен обеспечиваться сплошной контроль всей поверхности полупроводниковой пластины, что требует высокой производительности метода контроля. При прочих равных условиях сокращение времени измерений для повышения производительности контроля влечет ухудшение соотношения сигнал / шум, вступая в противоречие с требованием повышения чувствительности и достоверности. Еще одной нерешенной проблемой, отмечаемой в Перспективном плане, является неопределенность критериев разделения дефектов и некритичных отклонений параметров технологического процесса.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для бесконтактного неразрушающего контроля однородности распределения параметров полупроводниковых кремниевых пластин диаметром до 200 мм, включая картирование (визуализацию) распределения выявленных дефектов по поверхности пластины, в научно-исследовательской лаборатории полупроводниковой техники Белорусского национального технического университета создана измерительная установка сканирующей зондовой электрометрии, получившая обозначение СКАН-2019 (рис. 1). Установка обеспечивает контроль однородности физико-химического состояния по параметрам пространственного распределения работы выхода электрона (потенциала) поверхности (Scanning Kelvin Probe, SKP), контроль времени жизни (диффузионной длины) носителей заряда и его пространственного

распределения по параметрам поверхностной фото-ЭДС (Surface Photovoltage, SPV), а также контроль однородности пространственного распределения удельного электрического сопротивления рабочих субмикронных слоев полупроводниковых пластин (Junction Photovoltage, JPV) [2]. Функциональная схема установки построена по модульному принципу. Соответствующие функциональные модули (узлы) включают



Рисунок 1. Измерительная установка SKAN-2019

в себя измерительный преобразователь; электрометрический цифровой зонд, обеспечивающий формирование и первичную обработку сигнала первичного измерительного преобразователя; преобразователи поверхностного сопротивления; узлы формирования и регистрации поверхностной фото-ЭДС; вспомогательные узлы. Функциональность модулей может

быть расширена за счет программной обработки измерительных сигналов с использованием моделей односигнальных многопараметрических измерений.

Для реализации нескольких режимов измерения (SKP, SPV, JPV) преобразователь использует электродную систему сложной конфигурации, включающую четыре концентрических секторных электрода  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  и  $S_4$  (рис. 2). Электроды выполнены в форме печатных проводников на плате измерительного преобразователя. Для измерений, связанных с регистрацией поверхностной фотоЭДС в режимах SPV и JPV, излучение от нескольких монохроматических источников света (лазерных диодов) передается на поверхность полупроводниковой пластины в области выполнения измерений посредством гибкого волоконного световода. Точечное освещение полупроводниковой пластины или структуры через малое отверстие в центре электрода  $S_1$  используется при измерении удельного сопротивления ионно-легированных и диффузионных слоев по методу JPV. Электроды  $S_2$ ,  $S_3$  и  $S_4$  в этом случае используются для регистрации величины затухания и фазового сдвига сигнала поверхностной фотоЭДС на фиксированных расстояниях от точки воздействия с последующим автоматическим вычислением величины удельного сопротивления на основе соответствующей математической модели [3].



Рисунок 2. Комбинированный измерительный преобразователь для режимов SKP, SPV и JPV

Для повышения производительности измерений при сохранении присущей зондовым электрометрическим методам высокой чувствительности и обнаружительной способности контроля измерительный преобразователь построен по «цифровой» схеме, предусматривающей аналого-цифровое преобразование измерительного сигнала непосредственно по месту его формирования с последующей цифровой обработкой. В программном обеспечении измерительного преобразователя реализованы оригинальные алгоритмы цифровой обработки измерительного сигнала, обеспечивающие вычисление его параметров в режиме неполной компенсации сигнала электрометрического зонда [4], что позволило исключить из схемы преобразователя инерционное интегрирующее звено в цепи обратной связи, характеризующееся сравнительно длительным временем достижения установившегося режима.

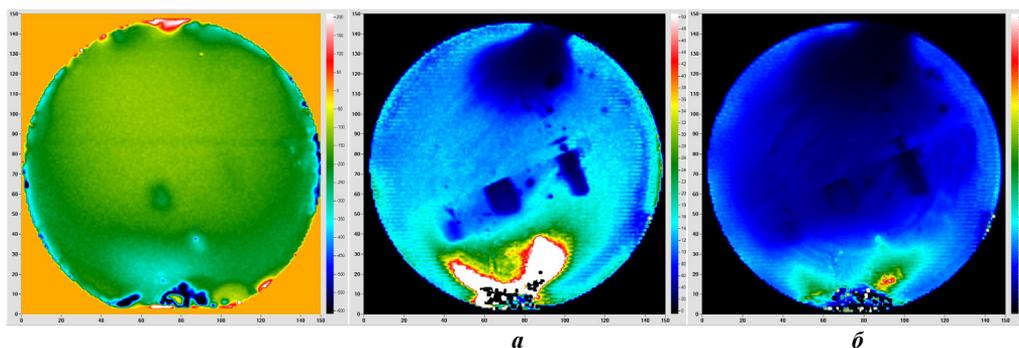
Особенностью измерительного преобразователя, также способствующей повышению быстродействия и улучшению отношения сигнал / шум, является его реализация в виде единой интегральной конструкции с чувствительным элементом вибрирующего зонда Кельвина, причем в качестве гибкого элемента преобразователя используется сама печатная плата, несущая электронные компоненты преобразователя. Материалом платы является гибкий теплостойкий стеклотекстолит толщиной 0,35 мм. В качестве силового привода вибрации используется плоская пьезоэлектрическая пластина, реализующая изгибные колебания.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Измерительная установка СКАН-2019 была использована для визуализации дефектов полупроводниковых пластин-спутников и рабочих пластин диаметром 100-200 мм, в том числе и для контроля дефектов сформированных на пластинах приборных структур. Пространственное разрешение контроля составляло не менее 0,5 мм, количество точек картирования, в зависимости от выбранного режима контроля и размера пластины – от 100 до 10000. Диапазон контроля электрического потенциала поверхности структуры кремний – диэлектрик соответствовал  $\pm (2 \dots 2500)$  мВ при динамической погрешности измерения не более 2,0 мВ. Удельное электрическое сопротивление ионно-легированных и диффузионных слоев на полупроводниковых пластинах контролировалось в диапазоне значений от 10 до 100 000 Ом/□ (Ом/кв).

Повторные исследования поверхности полупроводниковых пластин на разных стадиях технологического процесса позволили определить дополнительные характеристики их дефектов и, в ряде случаев, установить их физическую природу и возможный источник. Так, на рисунке 3 приведены результаты визуализации дефектов поверхности рабочей пластины диаметром 150мм с гетером (сурьма) по методу сканирующего зонда Кельвина (СКР). Параметры пластины: толщина окисла 600 нм, толщина гетера 1мкм, доза легирования  $5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ .

Результаты исследования пространственного распределения диффузионной длины поверхности той же пластины, полученные при использовании измерительного преобразователя в режиме SPV, приведены на рисунке 4, а. Далее пластина была подвергнута отжигу при 200 °С в течение 30 минут, после чего было выполнено повторное исследование электрического потенциала поверхности в режиме СКР и диффузионной длины в режиме SPV. Как видно из рисунка 4, б, характер распределения диффузионной длины после отжига соответствует таковому до отжига, однако абсолютные величины диффузионной длины претерпели изменения. В то же время, как пространственное распределение, так и значения электрического потенциала поверхности после отжига не изменились и в целом соответствовали приведенному на рисунке 3.



**Рисунок 3. Визуализация пространственного распределения электрического потенциала поверхности рабочей пластины (№ 1470-02) по методу SKP**

**Рисунок 4. Визуализация пространственного распределения диффузионной длины по поверхности рабочей пластины (№ 1470-02) до (а) и после (б) отжига при 200 °С**

Наблюдаемое изменение диффузионной длины объясняется присутствием в поверхностном слое рабочей пластины примеси железа, привнесенной в ходе процесса технологической обработки. Отжиг при 200 °С в течение 30 минут приводит к распаду пар Fe-B с выделением интерстициального железа, следствием чего и является изменение диффузионной длины. Использование известных математических моделей связи диффузионной длины с поверхностной концентрацией железа позволило количественно определить последнюю. В приведенном случае среднее значение концентрации примеси железа по пластине составило  $8,7 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$  (по всей поверхности) и  $5,63 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$  для центральной области пластины. Таким образом, совместное применение методов SKP, SPV и JPV с использованием единой измерительной установки позволяет не только визуализировать дефекты полупроводниковых пластин и структур с высокой обнаружительной способностью, но и проводить их классификацию для определения возможного источника дефектов.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

К настоящему времени установка СКАН-2019 включена в стандарт ОАО «Интеграл» «Методы контроля параметров материалов и полупроводниковых структур». Использование методов зондовой электротометрии (SKP, SPV, JPV) обеспечивает возможность сплошного неразрушающего контроля и своевременного выявления брака на всех стадиях технологического процесса производства полупроводниковых структур, что позволяет получить информацию об отклонениях параметров технологического процесса на ранних стадиях и за счет этого уменьшить процент брака и повысить процент выхода годных изделий.

Экономическая эффективность метода контроля достигается за счет своевременного выявления дефектов и критических отклонений параметров ионно-легированных и диффузионных слоев на полупроводниковых пластинах, не выявляемых другими неразрушающими методами, что позволяет исключить бракованные пластины из технологического процесса, а также выявить и устранить источник возникновения дефектов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. International Roadmap for Devices and Systems. 2021 Update: Yield Enhancement. – 47 p. [электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://irds.ieee.org/images/files/pdf/2021/2021IRDS\\_UE.pdf](https://irds.ieee.org/images/files/pdf/2021/2021IRDS_UE.pdf). – Дата доступа: 25.07.2022.
2. Пантелеев, К.В. Особенности распределения пространственного заряда композитных полимеров под действием внутренних механических напряжений / К.В. Пантелеев, О.К. Гусев, А.И. Свистун, Р.И. Воробей, К.Л. Тявловский, И.А. Жарин, А.В. Самарина // Приборостроение: материалы 12 междунар. науч.-техн. конф., Минск, 13–15 ноября 2019 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: О. К. Гусев (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2019. – С. 17–19.
3. Зондовые электрометрические методы для измерения удельного электрического сопротивления ионно-легированных и диффузионных слоев / Тявловский А.К., Воробей Р.И., Гусев О.К., Жарин А.Л., Пантелеев К.В., Петлицкий А.Н., Пилипенко В.А., Свистун А.И., Тявловский К.Л. // Приборостроение: материалы 12 междунар. науч.-техн. конф., Минск, 13–15 ноября 2019 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: О. К. Гусев (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2019. – С. 36–38.
4. Воробей, Р.И. Цифровой измеритель контактной разности потенциалов для сканирующей зондовой электрометрии / Р.И. Воробей, О.К. Гусев, А.Л. Жарин, В.А. Микитевич, К.В. Пантелеев, А.И. Свистун, А.К. Тявловский, К.Л. Тявловский // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации («Шлядинские чтения - 2020»): материалы XII Между нар. науч.-техн. конф. с элементами науч. шк и кон-курсом науч.-исслед. работ для студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Пенза, 16-18 марта 2020 г.) / под ред. д-ра техн. наук Е. А. Печерской. - Пенза: Изд-во ПТУ, 2020. – С. 56-60.

## ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$

В. Д. Живулько<sup>1</sup>, А. В. Мудрый<sup>1</sup>, О. М. Бородавченко<sup>1</sup>, А. В. Гацак<sup>1</sup>,  
В. П. Павловский<sup>2</sup>, Е. В. Луценко<sup>2</sup>, Г. П. Яблонский<sup>2</sup>, М. В. Якушев<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению,  
ул. П. Бровки, 19, 220072 Минск, Беларусь; e-mail: mudryi@physics.by

<sup>2</sup> Институт физики НАН Беларуси,  
пр. Независимости, 68-2, 220072 Минск, Беларусь; e-mail: v.pavlovskii@ifanbell.bas-net.by

<sup>3</sup> Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН,  
ул. С. Ковалевской, 18, 620108 Екатеринбург, Россия; e-mail: michael.yakushev@strath.ac.uk

Измерены оптическое пропускание и отражение тонких пленок  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$  с составами  $x = 0,34$  и  $x = 0,41$  при температурах 20, 80 и 300 К. Определена оптическая ширина запрещенной зоны  $E_g$  для двух составов тонких пленок  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ . Ширина запрещенной зоны для тонких пленок  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$  с  $x = 0,34$  составила 1,256 эВ, 1,256 эВ и 1,237 эВ при температурах 20, 80 и 300 К, а для  $x = 0,41$  – 1,387 эВ, 1,377 эВ и 1,290 эВ, соответственно. Обнаруженный эффект аномально большого температурного смещения на 97 мэВ оптической ширины запрещенной зоны твердых растворов  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$  с  $x = 0,41$  обусловлен термическим перераспределением носителей заряда на энергетических уровнях в потенциальных ямах разрешенных зон, обусловленных флуктуациями состава и электростатического потенциала в пленке.

**Ключевые слова:**  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ ; тонкие пленки; оптическое пропускание; отражение.