

## МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ФОТОСТИМУЛИРОВАННОЙ ЗОНДОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН

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

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

<sup>2</sup>НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «Интеграл»

Минск, Республика Беларусь

Применение в технологии полупроводниковых интегральных схем, 3-D приборов, композитных материалов и материалов с модифицированными свойствами требует развития методов контроля приповерхностных слоев материалов с широким диапазоном характеристик, определяющих их применимость в данной технологии, и приборных структур с малой толщиной активных областей. Особенно остро стоит проблема диагностики состояния нескольких верхних атомных слоев поверхности при производстве полупроводниковых приборных структур с субмикронными активными слоями, сенсорных и микроэлектромеханических структур (МЭМС).

При производстве полупроводниковых приборных структур используются диэлектрические, поликристаллические, металлические слои толщиной в несколько нанометров, кроме того и глубины залегания активных ионнолегированных слоев не превышают десятков нанометров. Фактически при изготовлении приборов задействован только тончайший верхний слой кремниевой пластины. Однако в процессе производства исходная кристаллографически совершенная кремниевая пластина подвергается большому количеству высокоэнергетических обработок, которые могут существенным образом нарушить совершенство пластины – вызвать генерацию кристаллографических дефектов или изменить примесный состав кремния. Это в свою очередь приводит к деградации характеристик элементов микросхем.

Важное значение в контроле технологии интегральных микросхем, особенно на основе субмикронных слоев, имеет не только контроль готовых приборных структур, но и исходных материалов и слоев, используемых в конкретных технологических операциях. Одним из основных параметров, характеризующих качество приповерхностных слоев полупроводниковых пластин является однородность пространственного распределения их электрофизических параметров, например, поверхностного сопротивления, по площади пластины. Параметром, напрямую не определяющим качество изготавливаемых приборов, но очень сильно зависящим от параметров кремниевой подложки и качества проведения технологических

операций является диффузионная длина или время жизни неравновесных носителей заряда, которые определяются как объемом кремниевой пластины, так и состоянием ее поверхности или границ раздела функциональных слоев.

Характерными общими требованиями к подобным методам контроля являются:

- высокая чувствительность к изменениям характеристик приповерхностных слоев материалов и приборных структур, связанных с параметрами готовых приборов;
- возможность бесконтактного, неразрушающего контроля больших площадей (в пределе – всей полупроводниковой пластины, например, диаметром 300 или 200 мм) в сочетании с высоким пространственным локальным разрешением (до единиц и долей мм);
- пространственная локализация участков поверхности (приборных структур) с отличными от нормальных значений электрофизических параметров приповерхностных слоев;
- бесконтактный, неразрушающий характер контроля, позволяющий возвращать пластины в технологический процесс;
- отсутствие специальных операций подготовки поверхности перед и после проведения контроля.

Комплексом характеристик, удовлетворяющим этим требованиям, обладает эффект поверхностной фотоЭДС, заключающийся в изменении электростатического потенциала поверхности полупроводника при воздействии на нее оптическим излучением, причем совокупность параметров приповерхностных слоев полупроводниковой структуры, определяющих формирование поверхностной фотоЭДС, зависит от длины волны оптического излучения. Этот эффект обнаружен и описан еще в середине XX века, однако его практическое применение до последнего времени сдерживалось недостаточными характеристиками элементной базы, необходимой для реализации бесконтактных методов измерения поверхностной фотоЭДС, и из-за отсутствия достоверных экспериментальных данных недостаточной проработкой моделей формирования измерительного сигнала. Величина поверхностной фотоЭДС непосредственно связана одновременно со многими физическими параметрами полупроводникового материала,

такими как время жизни неравновесных носителей заряда, удельное поверхностное сопротивление, наличие и концентрация поверхностных состояний (дефектов) и их энергетический спектр. С одной стороны, это позволяет в близких методиках измерения использовать данный параметр для контроля качества полупроводниковых пластин, с другой – затрудняет однозначную интерпретацию соответствия измерительного сигнала конкретному параметру материала или приборной структуры.

В течение ряда лет в НИЛ полупроводниковой техники БНТУ совместно с НПО «Интеграл» проводятся работы в области исследований и разработки методов и средств визуализации электрофизических параметров полупроводниковых пластин на основе методов зондовой электрометрии, в том числе с использованием дополнительных неразрушающих воздействий оптическим излучением, коронным разрядом, нагревом. Результатом первого этапа этих исследований явилось создание установки сканирующей зондовой электрометрии «СКАН-2013» (рисунок 1), реализующей метод сканирующего зонда Кельвина (SKP) [1]. Установка обеспечивает визуализацию дефектов поверхности полупроводниковых пластин на основе анализа пространственного распределения контактной разности потенциалов (КРП) поверхности. Кроме того, установка «СКАН-2013» обладает ограниченными возможностями по определению электрофизических параметров приповерхностных слоев полупроводника за счет заряжения его поверхности в коронном разряде, что позволяет регистрировать Q-V характеристику поверхностных структур.



Рисунок 1 – Установка сканирующей зондовой электрометрии (SKP) «СКАН-2013»

Развитием данной установки является установка фотостимулированной сканирующей зондовой электрометрии «СКАН-2015» (рисунок 2), дополнительно обеспечивающая визуализацию пространственного распределения поверхностной фотоЭДС (режим SPV) [2]. При поочередном освещении поверхности полупроводниковой структуры оптическим излучением с разными длинами волн и одинаковой интенсивностью

обеспечивается возможность определения длины диффузии неравновесных носителей заряда  $L_n$  на основании выражения [3]

$$L_n = \frac{\alpha(\lambda_1)V_p(\lambda_2) - \alpha(\lambda_2)V_p(\lambda_1)}{\alpha(\lambda_1)\alpha(\lambda_2)(V_p(\lambda_2) - V_p(\lambda_1))}, \quad (1)$$

где  $\alpha(\lambda)$  – коэффициент поглощения на длине волны  $\lambda$ ;  $V_p(\lambda)$  – фотоЭДС на длине волны  $\lambda$ .



Рисунок 2 – Установка фотостимулированной сканирующей зондовой электрометрии (SPV) «СКАН-2015»

Существенно, что генерация сигнала поверхностной фотоЭДС происходит в тонком (в пределах глубины проникновения оптического излучения) поверхностном слое, что позволяет контролировать свойства эпитаксиальных слоев независимо от подложки.

Проводимые в настоящее время исследования направлены на разработку методов и средств бесконтактного определения параметров легированных слоев кремниевых пластин (JRV), основанных на анализе особенностей спектрально-пространственных параметров поверхностной фотоЭДС путем контроля амплитуды и фазы фотоЭДС модулированного по длине волны и интенсивности луча света. К числу определяемых таким способом параметров относятся сопротивление ионно-легированного или диффузионного слоя, ток утечки  $p-n$  перехода и др. Датчик  $RsL$  в реализации метода JRV состоит из модулированного по яркости луча света и двух емкостных электродов (рисунок 3). Напряжение под датчиком в одномерной модели описывается выражением

$$V = A e^{-kx}, \quad (1)$$

где  $x$  – расстояние от датчика до освещенного участка;

$$k = (R_s G + i\omega R_s C_s)^{1/2},$$

$R_s$  – сопротивление слоя в переходе;

$G$  – проводимость перехода, позволяющая оценить ток утечки перехода;

$C_s$  – емкость подложки;

$\omega = 2\pi f$  – круговая частота модуляции оптического излучения.

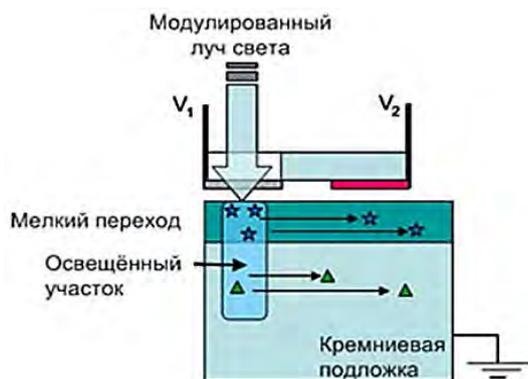


Рисунок 3 – Схема бесконтактного определения параметров легированных слоев кремниевых пластин на основе анализа спектрально-пространственных параметров поверхностной фотоЭДС

Методика измерения включает пространственное сканирование полупроводниковой пластины электрометрическим зондом  $R_sL$  и расчет значений  $R_s$  и  $I_0$  по модели (2) формирования поверхностной фотоЭДС в зависимости от параметров освещения и расстояния зонда от освещаемой области. Результатом применения данной методики является карта распределения  $R_s$  и токов утечки перехода. Таким образом, на основе методов зондовой электрометрии создается комплекс методов и средств, обеспечивающих бесконтактное неразрушающее определение однородности распределения параметров ионно-легированных и диффузионных слоев на полупроводниковых пластинах, включая длину диффузии или время жизни неравновесных носителей заряда, концентрацию примеси атомов железа или меди на поверхности [4],

сопротивление слоя в переходе, ток утечки перехода и др.

1. Воробей, Р.И. Контроль дефектов структуры кремний-диэлектрик на основе анализа пространственного распределения потенциала по поверхности полупроводниковых пластин / Р.И. Воробей, А.Л. Жарин, О.К. Гусев, А.Н. Петлицкий, В.А. Пилипенко, А.С. Турцевич, А.К. Тявловский, К.Л. Тявловский // Приборы и методы измерений. – 2013. – № 2(7). – С. 67-72.
2. Установка для контроля полупроводниковых пластин методом зонда Кельвина с дополнительными воздействиями / Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА: / Воробей Р.И., Гусев О.К., Жарин А.Л., Петлицкий А.Н., Пилипенко В.В., Тявловский А.К., Тявловский К.Л. / Материалы XIV научно-технической конференции. – М.: ОАО "НПП Пульсар", 2015. – С. 72-75.
3. Тявловский А.К., Пантелеев К.В., Жарин А.Л. Методы зондовой электрометрии для разработки и исследовании свойств перспективных материалов / Перспективные материалы и технологии: монография. В 2 т. Т1. / под ред. В.В. Клубовича – Витебск: Изд-во УО «ВГТУ». – 2015. – 398 с.
4. Воробей Р.И., Жарин А.Л., Микитевич В.А., Тявловский А.К., Тявловский К.Л., Пилипенко В.А., Петлицкий А.Н. Визуализация пространственного распределения примеси железа в кремнии на основе методов зондовой электрометрии / Приборостроение-2015: материалы 8-й Междунар. научно-техн. конф. В 2 т., Т1. – Минск: БНТУ, 2015. Т. 1 – С. 169-171.