

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многочисленные исследования, выполненные на других образцах, включая полупроводниковые пластины, непосредственно используемые для изготовления приборных структур и взятые на различных стадиях технологического процесса обработки, показали высокую эффективность средств зондовой электрометрии в выявлении и картировании примеси железа в кремнии *p*-типа. При этом полностью бесконтактный и неразрушающий характер измерений обеспечил возможность дальнейшего исследования пластин другими методами, либо же их возвращения в технологическую линию.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Рейви К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии. М.: Мир, 1984. 472 с.
2. Пилипенко, В.А. Методы и механизмы геттерирования кремниевых структур в производстве интегральных микросхем / В.А. Пилипенко [и др.] // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2013, № 2-3. – С. 43–57.

ЗОНДОВЫЕ ЗАРЯДОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ КОНТРОЛЕ ПРОИЗВОДСТВА БОЛЬШИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

К. Л. Тявловский¹, А. К. Тявловский¹, О. К. Гусев¹, Р. И. Воробей¹,
А. Л. Жарин¹, А. И. Свистун¹, В. А. Пилипенко², А. Н. Петлицкий²

¹ Белорусский национальный технический университет, пр. Независимости, 65,
220013 Минск, Беларусь, e-mail: nil_pt@bntu.by

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

Рассмотрено использование зондовых зарядочувствительных методов на основе сканирующего бесконтактного электрометрического зонда в неразрушающем контроле качества проведения технологических операций обработки полупроводниковых пластин диаметром до 200 мм. Контроль различных параметров поверхности полупроводниковой пластины (времени жизни неосновных носителей заряда, удельное поверхностное сопротивление ионно-легированных и диффузионных слоев) обеспечивается модификацией классического метода сканирующих электрометрических измерений, включающей дополнительные воздействия на образец (полупроводниковую пластину) оптическим излучением различных длин волн. Приведены краткие описания измерительных установок, реализующих разработанные методы измерений. Установки обеспечивают полностью неразрушающий контроль и визуализацию электрофизических параметров поверхности полупроводника и могут использоваться в межоперационном контроле производства больших интегральных схем.

Ключевые слова: полупроводниковая пластина; кремний; поверхность; неразрушающий контроль; зарядочувствительные измерения.

CHARGE-SENSITIVE PROBE METHODS IN TECHNOLOGICAL CONTROL OF BIG INTEGRATED CIRCUITS PRODUCTION

K. L. Tyavlovsky¹, A. K. Tyavlovsky¹, O. K. Gusev¹, R. I. Vorobey¹,
A. L. Zharin¹, A. I. Svistun¹, V. A. Pilipenko², A. N. Petlitsky²

¹⁾ Belarusian National Technical University, Nezavisimosti Av. 65, 220013 Minsk, Belarus
²⁾ JSC "INTEGRAL" – Holding Management Company, Kazintsya str., 121A, 220108 Minsk, Belarus
Corresponding author: K. L. Tyavlovsky (ktyavlovsky@bntu.by)

New charge-sensitive probe methods for technological control of big integrated circuit production are proposed on a basis of contactless scanning electrometry probe technique. To access different parameters of semiconductor wafer's surface including minor carrier lifetime and surface resistivity of ion-doped and diffusion layers, a classic scanning charge-sensitive probe technique was modified by augmentation of electrometric measurements with illumination of semiconductor surface at different wavelengths. The proposed methods are implemented in measurement installation designs described in the paper. The described installations provide completely non-destructive testing and visualization of semiconductor surface properties and can be used in the interoperational control of big integrated circuits production.

Key words: semiconductor wafer; silicon; surface; non-destructive testing; charge-sensitive measurements.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие технологии полупроводниковых интегральных схем, связанное с увеличением степени интеграции и уменьшением характерных размеров приборных структур, 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 больших интегральных схем (БИС) с субмикронными активными слоями. При этом качество технологического процесса характеризуется не только достигнутыми значениями электрофизических параметров поверхности полупроводниковой пластины, но и, в большей степени, однородностью пространственного распределения этих параметров по всей поверхности пластины.

Зондовые зарядочувствительные методы контроля, основанные на использовании сканирующего бесконтактного емкостного зонда в качестве первичного измерительного преобразователя, обеспечивают эффективное неразрушающее картирование электростатического потенциала или контактной разности потенциалов (КРП) поверхности полупроводника и при этом обладают высокой чувствительностью к любым дефектам и неоднородностям поверхности [1, 2]. Существенным преимуществом таких методов является то, что формирование измерительного сигнала происходит в пределах Дебаевской длины экранирования, что для кремния составляет несколько атомарных слоев и позволяет контролировать электрофизические свойства тонких диффузионных и ионно-легированных слоев независимо от свойств подложки. При этом, благодаря большой Дебаевской длине экранирования диэлектриков,

наличие на поверхности полупроводниковой пластины диэлектрических слоев не оказывает влияния на результаты контроля. Основным фактором, сдерживающим применение зондовых электрометрических методов, является сложность интерпретации результатов контроля, поскольку регистрируемый электростатический потенциал поверхности полупроводника является комплексным параметром, некоррелированно и сложным образом зависящим одновременно от ряда электрофизических параметров поверхности полупроводника [1].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для решения проблемы контроля конкретных электрофизических параметров поверхности полупроводниковой пластины были рассмотрены возможности модификации классических методов сканирующей зондовой электрометрии путем введения дополнительных неразрушающих воздействий на поверхность образца. Контролируемое использование дополнительных воздействий позволяет выделить влияние на измеряемый сигнал только контролируемого параметра. При этом наибольший интерес с точки зрения технологии производства БИС представляют такие параметры, как длина диффузии или время жизни неосновных носителей заряда (ННЗ) и удельное поверхностное сопротивление ионно-легированных и диффузионных слоев малой толщины. Результаты проведенных исследований показали, что наиболее целесообразным для решения данной задачи является использование дополнительных неразрушающих воздействий с целью локального изменения зарядового состояния поверхности полупроводниковой пластины, таких как освещение участка поверхности оптическим излучением различных длин волн заданной интенсивности.

Воздействие оптическим излучением на полупроводник приводит к возникновению эффекта поверхностной фотоЭДС, связанного с генерацией неравновесных носителей заряда (ННЗ) и проявляющегося в виде локального изменения электрического потенциала поверхности, которое может быть зафиксировано зондовым электрометрическим преобразователем. Поскольку одновременно с генерацией имеют место процессы диффузии и рекомбинации ННЗ, величина регистрируемой поверхностной фотоЭДС будет уменьшаться по мере удаления от точки воздействия, причем характер изменения поверхностной фотоЭДС связан с электрофизическими параметрами полупроводника, в частности, длиной диффузии ННЗ и удельным поверхностным сопротивлением, однозначной зависимостью. Это позволяет, используя известные математические модели, определять указанные электрофизические параметры на основе регистрации поверхностной фотоЭДС на различном удалении от места генерации ННЗ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты математического моделирования показали, что для определения длины диффузии ННЗ целесообразно воспользоваться зависимостью коэффициента поглощения оптического излучения в кремнии от длины волны излучения. Поскольку поглощение оптического излучения в веществе описывается законом Бугера-Ламберта-Бэра, различие коэффициентов поглощения α приводит к разному профилю генерации ННЗ по глубине для оптического излучения различных длин волн λ , а результирующая зависимость поверхностной фотоЭДС $V_p(\alpha)$ описывается законом вида:

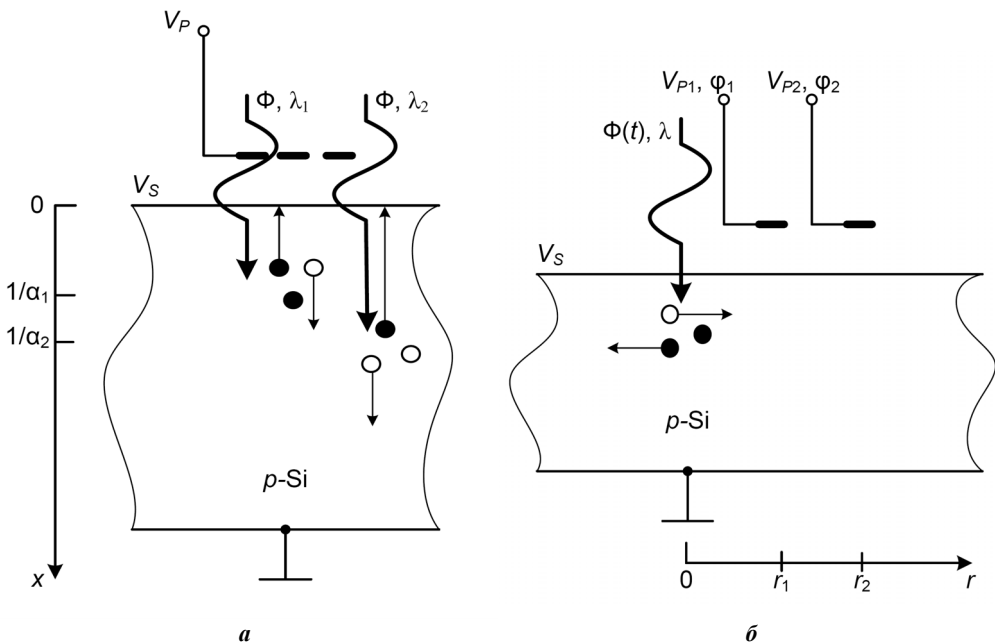
$$\frac{1}{V_p} \approx C_2 \left(L_n + \frac{1}{\alpha} \right), \quad (1)$$

где L_n – длина диффузии ННЗ; C_2 – константа, определяемая собственными параметрами полупроводника (концентрацией легирующей примеси, скоростью рекомбинации ННЗ и др.), температурой окружающей среды и плотностью мощности воздействующего оптического излучения Φ .

Теоретическое определение константы C_2 составляет трудноразрешимую задачу. В связи с этим разработанная методика измерений предусматривает поочередное освещение участка поверхности под полупрозрачным электродом емкостного электрометрического зонда оптическим излучением с длинами волн λ_1, λ_2 , характеризующимися коэффициентами поглощения α_1, α_2 , и регистрацию соответствующих значений поверхностной фотоЭДС V_{p1}, V_{p2} (рисунок 1а) с последующим расчетом значения длины диффузии ННЗ L_n по формуле:

$$L_n = \frac{V_{p2} \cdot \frac{1}{\alpha_2} - V_{p1} \cdot \frac{1}{\alpha_1}}{V_{p1} - V_{p2}}. \quad (2)$$

Для повышения достоверности получаемых результатов методика измерений предусматривает использование нескольких (до четырех) длин волн [2].



а) Измерение длины диффузии ННЗ L_n .

б) Измерение удельного поверхностного сопротивления R_s

Рисунок 1. – Схема измерения параметров ионно-легированных и диффузионных слоев полупроводника с использованием зондовых зарядочувствительных методов

Латеральное распределение поверхностной фотоЭДС определяется величиной удельного поверхностного сопротивления полупроводниковой пластины R_S . Математическая модель для данного случая отличается большой сложностью и требует для вычисления R_S системы из нескольких дифференциальных уравнений, решение которой возможно при условии, что плотность мощности оптического излучения Φ является переменной величиной, зависящей от времени. В рамках разработанной методики измерений последнее обеспечивается периодической модуляцией потока оптического излучения. Для измерений удельного поверхностного сопротивления используется чувствительный элемент специальной конфигурации, включающий несколько концентрических секторных электродов, отстоящих на различные расстояния r от точки воздействия модулированным оптическим излучением по оси чувствительного элемента. Данные электроды используются для регистрации амплитуд V_{P1} , V_{P2} и фазовых сдвигов φ_1 , φ_2 на различных расстояниях r_1 , r_2 от точки воздействия модулированным оптическим излучением (рисунок 1, б), а величина удельного поверхностного сопротивления R_S определяется путем решения системы уравнений с использованием быстродействующей микропроцессорной системы [3].

Разработанные методы контроля параметров ионно-легированных и диффузионных слоев полупроводника реализованы в конструкции разработанных в научно-исследовательской лаборатории полупроводниковой техники Белорусского национального технического университета измерительных установок СКАН-2015 и СКАН-2019. Установки обеспечивают картирование поверхности полупроводниковых пластин диаметром до 200 мм по параметрам поверхностного электростатического потенциала, длины диффузии ННЗ и удельного поверхностного сопротивления в диапазоне от 10 до 100 000 Ом/квадрат с визуализацией результатов картирования в виде цветного (с использованием условных цветов) или трехмерного изображения (рисунок 2).

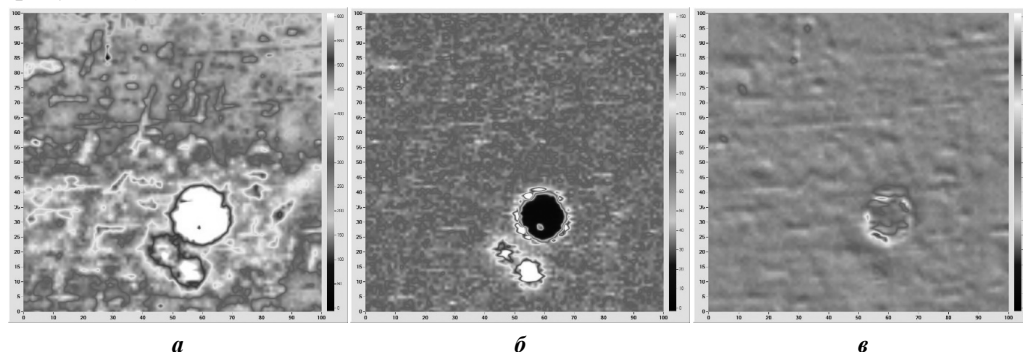


Рисунок 2 – Характеризация дефектов эпитаксиального слоя кремниевой пластины:
a – в режиме сканирующего зонда Кельвина (электростатический потенциал поверхности);
б – в режиме измерения времени жизни ННЗ;
в – в режиме измерения удельного поверхностного сопротивления

Такое представление результатов измерений обеспечивает наглядную и оперативную оценку однородности распределения контролируемых параметров по поверхности пластины или выбранного участка ее поверхности, что позволяет использовать данные установки в технологическом контроле производства больших интегральных схем [4]. Отметим, что использование контактных зондовых методов для измерения удельного электрического сопротивления на слоях субмикронной толщины неприменимо [3]. Пространственное разрешение измерительных установок составляет величину не-

сколько более 0,1 мм, а применённые методы обработки измерительного сигнала и параметры дополнительных воздействий обеспечивают измерение параметров диффузионных и ионно-легированных слоёв толщиной от 0,1 до 10 мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существенным преимуществом зондовых зарядочувствительных методов является их бесконтактность, что позволяет возвращать исследованные пластины в производственный процесс и исключает необходимость использования пластин-спутников. Это также обеспечивает возможность исследования «биографии» пластин в процессе технологии изготовления приборных структур, процессов модификации дефектов технологическими операциями, их влияния на параметры материала и приборных структур, и, в конечном итоге, на процент выхода годных приборов с учетом локализации отклонений контролируемых параметров материала от допустимых значений. В ходе эксплуатации установок практически подтверждена возможность контроля параметров ионно-легированных и диффузионных слоёв субмикронной толщины, что недоступно другим неразрушающим методам контроля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Schroder, D.K. Semiconductor Material and Device Characterization / D.K. Schroder // Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, Inc. – 2006. – 790 p.
2. Характеризация электрофизических свойств границы раздела кремний-двуокись кремния с использованием методов зондовой электротометрии / В.А. Пилипенко [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2017, Т. 8, № 4. – С. 344–356.
3. Зондовые электротометрические методы для измерения удельного электрического сопротивления ионно-легированных и диффузионных слоёв / А.К. Тявловский [и др.] // Приборостроение: материалы 12 между-нар. 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. Influence of rapid thermal treatment of initial silicon wafers on the electrophysical properties of silicon dioxide obtained by pyrogenous oxidation / V.A. Pilipenko [et al.] // High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes. – 2019. – V. 23, № 3. – P. 283–290. DOI: 10.1615/HighTempMatProc. 2019031122.

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ КОМПОЗИЦИИ ОКСИДА ВОЛЬФРАМА С ГРАФЕНОМ

**А. А. Хорт¹, А. А. Савицкий², Ю. С. Гайдук², Н. М. Лапчук²,
А. Е. Усенко², В. В. Паньков²**

¹⁾ *KTH Royal Institute of Technology, Stockholm 100-44, Sweden*

²⁾ *Белорусский государственный университет, просп. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь
e-mail: j_hajduk@bk.ru*

Методами рентгенофазового анализа, сканирующей и просвечивающей микроскопии, электронного парамагнитного резонанса исследована структура и морфология композиции оксида вольфрама с графеном. Оксид вольфрама был получен зольгель методом, графен - методом горения в растворе. Сделан вывод о структурном разупорядочении и формировании более сложной дефектной структуры в образцах