

УДК 620.191.4

Характеризация электрофизических свойств границы раздела кремний-диоксид кремния с использованием методов зондовой электрометрии

Пилипенко В.А.¹, Солодуха В.А.¹, Филипена В.А.¹, Воробей Р.И.², Гусев О.К.², Жарин А.Л.¹, Пантелеев К.В.², Свистун А.И.², Тявловский А.К.², Тявловский К.Л.²

¹ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,
ул. Казинца, 121А, г. Минск 220108, Беларусь

²Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь

Поступила 12.10.2017

Принята к печати 28.11.2017

Анализ микронеоднородностей в системе кремний-диоксид кремния становится наиболее актуальным в связи с переходом микроэлектронной промышленности к субмикронным проектным нормам и уменьшением толщины подзатворного диэлектрика. Целью исследования являлось развитие методов неразрушающего контроля полупроводниковых пластин на основе определения электрофизических свойств границы раздела кремний-диоксид кремния и их пространственного распределения по поверхности пластины бесконтактными методами зондовой электрометрии.

Характеризация границы раздела кремний-диоксид кремния осуществлялась методами анализа вольт-фарадных характеристик и методом сканирующего зонда Кельвина. Исследования выполнялись на материале пластин кремния КЭФ 4,5 и КДБ 12 ориентации <100> диаметром 100 мм.

Данные исследования показали, что после проведения быстрой термической обработки наблюдается равномерное распределение поверхностного потенциала по площади пластины. При этом имеет место значительное повышение электрического поверхностного потенциала на границе раздела кремний-диоксид кремния. Повышение регистрируемых значений поверхностного потенциала коррелирует с уменьшением плотности заряда на границе раздела кремний-диоксид кремния. Также изменение поверхностного потенциала по площади пластины после предварительной быстрой термообработки позволяет говорить об изменении структуры поверхностного слоя в полупроводниковой структуре.

Результаты характеризации с использованием методов зондовой электрометрии качественно отражают изменение плотности заряда на границе раздела кремний-диоксид кремния в процессе технологической обработки полупроводниковых пластин. Неоднородности распределения поверхностного потенциала наглядно отражают неоднородности распределения толщины нарушенного в процессе окисления слоя по поверхности пластины и позволяют выявить места локализации дефектов, связанных с нарушением структуры полупроводника у границы раздела кремний-диоксид кремния.

Ключевые слова: структура кремний-диоксид кремния, термообработка, зонд Кельвина, вольт-фарадная характеристика, заряд на границе раздела.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-344-356

Адрес для переписки:

Тявловский А.К.
Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: tyavlovsky@bntu.by

Address for correspondence:

Tyavlovsky Andrey
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: tyavlovsky@bntu.by

Для цитирования:

Пилипенко В.А., Солодуха В.А., Филипена В.А., Воробей Р.И.,
Гусев О.К., Жарин А.Л., Пантелеев К.В., Свистун А.И.,
Тявловский А.К., Тявловский К.Л.

Характеризация электрофизических свойств границы раздела кремний-диоксид кремния с использованием методов зондовой электрометрии.

Приборы и методы измерений.
2017. – Т. 8, № 4. С. 344–356.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-344-356

For citation:

Pilipenko V.A., Saladukha V.A., Filipena V.A., Vorobey R.I.,
Gusev O.K., Zharin A.L., Pansialeyeu K.V., Svistun A.I.,
Tyavlovsky A.K., Tyavlovsky K.L.

[Characterization of the electrophysical properties of silicon-silicon dioxide interface using probe electrometry methods].

Devices and Methods of Measurements.
2017, vol. 8, no. 4, pp. 344–356 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-344-356

Characterization of the electrophysical properties of silicon-silicon dioxide interface using probe electrometry methods

Pilipenko V.A.¹, Saladukha V.A.¹, Filipenya V.A.¹, Vorobey R.I.², Gusev O.K.², Zharin A.L.¹, Pantsialeyeu K.V.², Svistun A.I.², Tyavlovsky A.K.², Tyavlovsky K.L.²

¹«Integral» Joint Stock Company,
Kazintsa Str., 121 A, Minsk 220108, Belarus

²Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus

Received 12.10.2017

Accepted for publication 28.11.2017

Abstract

Introduction of submicron design standards into microelectronic industry and a decrease of the gate dielectric thickness raise the importance of the analysis of microinhomogeneities in the silicon-silicon dioxide system. However, there is very little to no information on practical implementation of probe electrometry methods, and particularly scanning Kelvin probe method, in the interoperational control of real semiconductor manufacturing process. The purpose of the study was the development of methods for nondestructive testing of semiconductor wafers based on the determination of electrophysical properties of the silicon-silicon dioxide interface and their spatial distribution over wafer's surface using non-contact probe electrometry methods.

Traditional C-V curve analysis and scanning Kelvin probe method were used to characterize silicon-silicon dioxide interface. The samples under testing were silicon wafers of KEF 4.5 and KDB 12 type (orientation <100>, diameter 100 mm).

Probe electrometry results revealed uniform spatial distribution of wafer's surface potential after its preliminary rapid thermal treatment. Silicon-silicon dioxide electric potential values were also higher after treatment than before it. This potential growth correlates with the drop in interface charge density. At the same time local changes in surface potential indicate changes in surface layer structure.

Probe electrometry results qualitatively reflect changes of interface charge density in silicon-silicon dioxide structure during its technological treatment. Inhomogeneities of surface potential distribution reflect inhomogeneity of damaged layer thickness and can be used as a means for localization of interface treatment defects.

Keywords: silicon-silicon dioxide structure, thermal treatment, Kelvin probe, C-V curve, interface charge.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-344-356

Адрес для переписки:

Тявловский А.К.
Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: tyavlovsky@bntu.by

Address for correspondence:

Tyavlovsky Andrey
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: tyavlovsky@bntu.by

Для цитирования:

Пилипенко В.А., Солодуха В.А., Филипья В.А., Воробей Р.И.,
Гусев О.К., Жарин А.Л., Пантелеев К.В., Свистун А.И.,
Тявловский А.К., Тявловский К.Л.

Характеризация электрофизических свойств границы раздела кремний-диоксид кремния с использованием методов зондовой электрометрии.

Приборы и методы измерений.

2017. – Т. 8, № 4. С. 344–356.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-344-356

For citation:

Pilipenko V.A., Saladukha V.A., Filipenya V.A., Vorobey R.I.,
Gusev O.K., Zharin A.L., Pantsialeyeu K.V., Svistun A.I.,
Tyavlovsky A.K., Tyavlovsky K.L.

[Characterization of the electrophysical properties of silicon-silicon dioxide interface using probe electrometry methods].

Devices and Methods of Measurements.

2017, vol. 8, no. 4, pp. 344–356 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-344-356

Введение

Система структурных слоев Si-SiO₂ является ключевой в конструкции кремниевых интегральных схем. Анализ микронеоднородностей в данной системе становится наиболее актуальным в связи с переходом к субмикронным проектным нормам и уменьшением толщины подзатворного диэлектрика. При проектных нормах 0,35 мкм требуемая толщина подзатворного диэлектрика уменьшается до 5,0 нм. Так как тонкий слой диэлектрика формируется термическим окислением из поверхности кремния, то дефекты поверхностного слоя кремния формируют дефекты и в структуре диэлектрика. Таким образом, разброс параметров приборных структур во многом определяется дефектами в системе Si-SiO₂.

Недостатки традиционных методов и средств контроля структурных слоев Si-SiO₂, основанных на исследовании их вольтфарадных характеристик, определяются необходимостью создания в процессе измерений непосредственного электрического контакта с поверхностью образца, что изменяет ее состояние и может привести к повреждению структуры [1]. В связи с этим в последнее время в мире уделяется большое внимание развитию бесконтактных методов характеристики полупроводниковых структур, в первую очередь основанных на использовании метода сканирующего зонда Кельвина. Одним из преимуществ использования сканирующего зонда является возможность представления результатов характеристики в виде наглядных цветных карт распределения контролируемого параметра. Определение конкретных физических параметров полупроводниковой структуры при этом не обеспечивается [2]. Для количественного определения таких характеристик полупроводниковых структур, как время жизни неравновесных носителей заряда, подвижность носителей заряда в слое инверсии, плотность заряда на ловушках на границе раздела кремний-диэлектрик, эквивалентная толщина диэлектрика, концентрация примеси тяжелых металлов (в частности, железа) в поверхностных слоях полупроводника, разными авторами предлагалось дополнение методов зондовой электрометрии и, в частности, метода зонда Кельвина, дополнительными воздействиями на исследуемую полупроводниковую структуру в виде осаждения заряда в коронном разряде, освещения поверхности, нагрева [2–6]. Указанные воздействия (в первую очередь, воздействие

коронным разрядом) в большинстве случаев несовместимы с режимом сканирования либо же существенно увеличивают время единичного измерения, что лишает метод зонда Кельвина важного преимущества – возможности получения карт распределения контролируемого параметра. Проблема удаления сформированного дополнительными воздействиями заряда на поверхности полупроводниковой структуры к настоящему времени также удовлетворительно не решена [7]. Вследствие этого в научной литературе отсутствуют данные о практическом применении методов зондовой электрометрии и, в частности метода сканирующего зонда Кельвина, в межоперационном контроле полупроводниковых структур в рамках реального производства.

Целью настоящего исследования являлось развитие методов неразрушающего контроля полупроводниковых пластин на основе определения электрофизических свойств границы раздела кремний-двуокись кремния и их пространственного распределения по поверхности пластины бесконтактными методами зондовой электрометрии. В число основных задач исследования входило сопоставление результатов характеристики полупроводниковых структур традиционными методами и методами зондовой электрометрии для определения применимости последних в межоперационном контроле технологических процессов производства изделий микроэлектроники. В качестве объекта исследования использовались кремниевые пластины в процессе формирования двуокиси кремния, полученной пирогенным окислением.

Методика исследований

В основу характеристики границы раздела кремний-двуокись кремния методами зондовой электрометрии положен метод сканирующего зонда Кельвина [8]. Принцип действия зонда заключается в регистрации контактной разности потенциалов (КРП) между поверхностью чувствительного элемента, играющего роль эталонной обкладки динамического измерительного конденсатора, и локальным участком поверхности исследуемого образца. Величина КРП определяется разностью значений работы выхода электрона (РВЭ) обкладок динамического конденсатора в соответствии с выражением:

$$U_{CPD} = \frac{\Phi_P - \Phi_S}{e}, \quad (1)$$

где φ_p – РВЭ поверхности чувствительного элемента; φ_s – РВЭ исследуемого участка поверхности образца; e – элементарный заряд (заряд электрона).

В процессе сканирования величина φ_p эталонной обкладки остается неизменной. Отсюда следует, что пространственное распределение КРП (поверхностного потенциала) по поверхности полупроводниковой пластины отражает пространственное распределение РВЭ, взятой с обратным знаком (большим значениям РВЭ соответствуют меньшие значения КРП). В настоящем исследовании используется представление результатов сканирования в виде двумерной карты распределения поверхностного потенциала (КРП) с отображением значений последнего условными индексными цветами. Регистрация пространственного распределения поверхностного потенциала осуществлялась с помощью измерительной установки бесконтактной характеристики полупроводниковых структур СКАН-2013.

РВЭ является комплексной характеристикой поверхности, зависящей от ее химического состава, кристаллической структуры, наличия и знака механических напряжений и др. [8–11]. Вследствие этого анализ пространственного распределения КРП может применяться для выявления дефектов полупроводниковой структуры, таких как дислокации, поверхностные загрязнения, неравномерность толщины либо несплошность окисла и др. [8]. При наличии на поверхности пластины диэлектрического слоя двуокиси кремния, как это имеет место в настоящем исследовании, значение КРП в значительной степени определяется встроенным зарядом в диэлектрике и на границе раздела кремний-двуокись кремния. Плотность заряда может использоваться как характеристика дефектности границы раздела кремний-двуокись кремния [12].

Теория взаимодействия электрического заряда в зазоре динамического конденсатора с его обкладками подробно рассмотрена в работе [13]. Заряд с ненулевой плотностью Q наводит на обкладках заряды с плотностями q_1 и q_2 (рисунок 1). Согласно закону Гаусса,

$$Q = q_1 + q_2. \quad (2)$$

Статический заряд не создает дополнительной разности потенциалов U_{12} между обкладками:

$$U_{12} = U_1 + U_2 = 0, \quad (3)$$

что обеспечивается равенством нулю суперпозиции электрических полей в зазорах d_1 и d_2 :

$$E_1 d_1 + E_2 d_2 = 0. \quad (4)$$

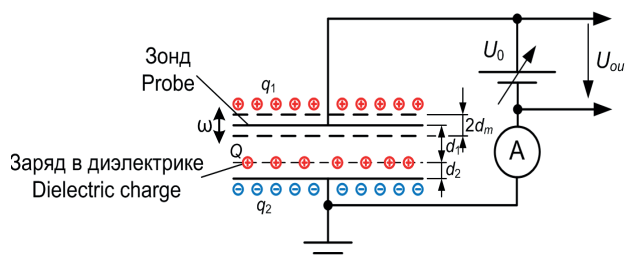


Рисунок 1 – Модель взаимодействия заряда в диэлектрике с чувствительным элементом сканирующего зонда Кельвина (динамического конденсатора)

Figure 1 – Model of dielectric charge and Kelvin probe (dynamic capacitor) interaction

Максимальная разрешающая способность сканирующего зонда Кельвина обеспечивается при условии, что зазор зонд-образец составляет величину, существенно меньшую поперечных размеров чувствительного элемента [14]. Это позволяет в рамках настоящего физического моделирования рассматривать систему «зонд – дефектная поверхность» диэлектрика как плоскопараллельный конденсатор. Для плоскопараллельного конденсатора плотность заряда и напряженность электрического поля связаны соотношениями:

$$E_1 = \frac{q_1}{\varepsilon_0}, \quad E = \frac{q_2}{\varepsilon_0}, \quad (5)$$

где ε_0 – электрическая постоянная.

Поскольку верхняя обкладка динамического конденсатора (чувствительный элемент) является вибрирующей, зазор d_1 изменяется во времени по закону:

$$d_1(t) = d_{10} + d_m \sin \omega t. \quad (6)$$

Модуляция зазора $d_1(t)$ приводит к периодическому изменению распределения электрических полей E_1 и E_2 . Поскольку заряд Q фиксирован по величине и пространственному положению, изменение напряженности электрических полей может происходить только вследствие перераспределения зарядов q_1 и q_2 между обкладками динамического конденсатора посредством внешней электрической цепи, что означает возникновение ненулевого переменного тока $i_Q(t)$ в этой цепи. Круговая частота тока $i_Q(t)$ составляет ω . Значе-

ние данного тока можно определить как производную от заряда q_1 по времени на основе выражений (2)–(6):

$$i_Q(t) = \frac{dq_1}{dt} = \frac{d_2 Q d_m \omega \cos \omega t}{(d_{10} + d_m \sin \omega t + d_2)^2}. \quad (7)$$

Регулируемый источник ЭДС U_0 во внешней цепи динамического конденсатора создает компенсационный ток $i_B(t)$, равный:

$$i_B(t) = \frac{dC}{dt} U_0 = \frac{\varepsilon d_m \omega \cos \omega t}{(d_{10} + d_m \sin \omega t + d_2)^2} U_0. \quad (8)$$

При реализации нулевого компенсационного метода измерений имеет место равенство измерительного и компенсационного токов $i_Q(t) = i_B(t)$. Тогда из (7) и (8):

$$U_{out} = U_0 = \frac{Q}{\varepsilon_0} d_2. \quad (9)$$

Таким образом, выходной сигнал сканирующего зонда Кельвина при контроле дефектов диэлектрического слоя представляет собой постоянное напряжение, величина которого прямо пропорциональна плотности заряда в диэлектрике.

Особенный интерес в свете сказанного представляет возможность неразрушающего выявления и локализации дефектов, вносимых ключевыми операциями технологической обработки: окисления и подготовки пластин перед окислением, для чего в настоящем исследовании выполнено сопоставление карт распределения поверхностного потенциала для одних и тех же полупроводниковых пластин до и после проведения технологических операций.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследования выполнялись на материале пластин кремния КЭФ 4,5 и КДБ 12 ориентации <100> диаметром 100 мм. Перед формированием подзатворного диэлектрика толщиной 42,5 нм путем пирогенного окисления при температуре 850 °С в течение 40 мин проводилась химическая обработка пластин в КАРО, ПАР5. Часть пластин перед этим проходила быструю термообработку. Быстрая термообработка нерабочей стороны пластины проводилась некогерентным оптическим излучением в течение 7 с, обеспечивая нагрев до температуры 1100 °С в естественных атмосферных условиях. После операций технологической обработки с помощью измерительной системы бесконтактной характеристики полупроводниковых структур СКАН-2013 выполнялись исследования распределения КРП по всей площади рабочей поверхности указанных пластин. Дополнительно традиционными методами [15, 16] на основе анализа вольт-фарадных характеристик определялись напряжения плоских зон и плотность заряда на границе раздела кремний-двуокись кремния, а также значения пробивных напряжений и токов утечки МДП-структур.

Исследование вольт-фарадных характеристик оксидных пленок на пластинах, прошедших быструю термообработку, показывает значительное улучшение их параметров. Наблюдается уменьшение как напряжения плоских зон, так и плотности заряда на границе раздела кремний-двуокись кремния (таблица 1).

Анализ хода этих характеристик показывает (рисунок 2, 3), что проведение быстрой тер-

Таблица 1 / Table / 1

Параметры границы раздела кремний-двуокись кремния, выращенной на кремнии без и с предварительной быстрой термообработкой
Properties of silicon-silicon dioxide interface for oxide layers grown after preliminary rapid thermal treatment and without preliminary treatment

Параметры двуокиси кремния Silicon dioxide properties	Тип пластины Wafer type			
	КЭФ 4,5 KEF 4,5		КЭФ 4,5 KEF 4,5	
	Без обработки Non-treated	С обработкой Treated	Без обработки Non-treated	С обработкой Treated
Толщина пленки, нм Layer thickness, nm	48,1	48,1	48,4	48,5
Напряжение плоских зон, В Flat zones voltage, V	-0,331	-0,324	-1,837	-1,773
Плотность заряда, см ⁻² Charge density, cm ⁻²	5,26 · 10 ¹⁰	3,41 · 10 ¹⁰	3,80 · 10 ¹¹	3,52 · 10 ¹¹

мической обработки перед окислением приводит к уменьшению заряда на границе раздела. Однако на поверхности окисленной пластины по-прежнему присутствует сильный инверсионный слой, обусловленный наличием положительного заряда в окисле [17, 18]. Его наличие приводит на структуре с *p*-типом кремния к существенному подъему правой ветви вольт-фарадной характеристики с минимального значения 0,4–0,45 отн.ед. до значений по вертикальной оси 0,72–0,78 отн.ед. Наличие перегибов в области подъема свидетельствует о значительной плотности быстрых поверхностных состояний на границе раздела. Скачкообразное увеличение емкости для кремния *p*-типа проводимости в области перехода от обеднения к инверсии при определенном пороговом напряжении может быть связано с наличием положительного заряда в окисле и формированием инверсного слоя как под контактом, так и вблизи за его пределами. В нашем случае это, по-видимому, обусловлено положительным

зарядом, сформированным за счет быстрых поверхностных состояний, связанных с наличием оборванных связей кремния, на границе раздела $\text{SiO}_2\text{-Si}$ и присутствием на ней, а также в объеме двуокиси кремния, гидроксильных групп и водорода, образованию которых способствует метод ее получения при низких температурах.

В результате исследований пространственного распределения КРП с использованием метода сканирующего зонда Кельвина были получены карты распределения значений КРП по поверхности пластин с пространственным разрешением 1 мм. Такое представление результатов (рисунок 4) позволило оценить не только средние значения потенциала для каждого из исследованных образцов, но также и равномерность распределения электрофизических свойств поверхности и выявить места локализации дефектов границы раздела кремний-двуокись кремния, характеризующиеся резкими отклонениями локальных значений КРП.

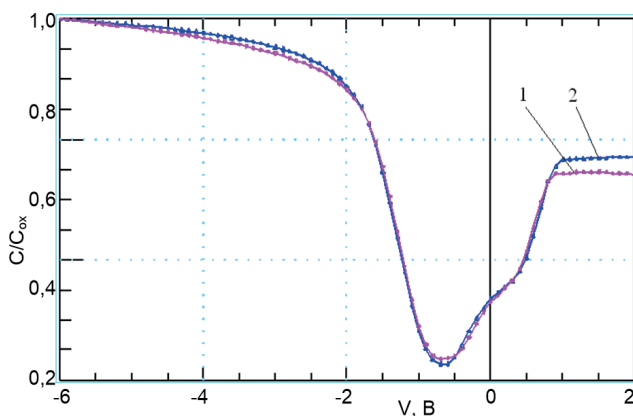


Рисунок 2 – Вольт-фарадные характеристики МОП-структуры, полученной пирогенным окислением кремния КДБ 12: 1 – с предварительной быстрой термообработкой; 2 – без предварительной быстрой термообработки

Figure 2 – Capacitance-voltage (CV) curves of MOS structure produced by pyrogenic oxidation of KDB 12 silicon wafer: 1 – with preliminary rapid thermal treatment; 2 – without preliminary rapid thermal treatment

Данные исследования показали, что после проведения быстрой термической обработки наблюдается равномерное распределение поверхностного потенциала по площади пластины (рисунок 4). При этом имеет место значительное повышение электрического поверхностного потенциала на границе раздела кремний-двуокись кремния. Так, на пластинах КЭФ 4,5, не проходивших предварительной быстрой термообработки, КРП повы-

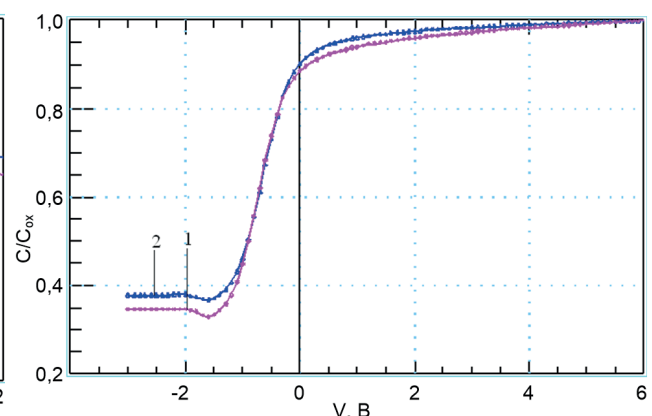


Рисунок 3 – Вольт-фарадные характеристики МОП-структуры, полученной пирогенным окислением кремния КЭФ 4,5: 1 – с предварительной быстрой термообработкой; 2 – без предварительной быстрой термообработки

Figure 3 – Capacitance-voltage (CV) curves of MOS structure produced by pyrogenic oxidation of KEF 4,5 silicon wafer: 1 – with preliminary rapid thermal treatment; 2 – without preliminary rapid thermal treatment

силась с $-1,211$ до $-0,215$ В, а для пластин, прошедших обработку, она повысилась с $-1,134$ до $-0,052$ В. В случае пластин КДБ 12 эти величины составили с $-0,725$ до $-0,210$ В и с $-0,359$ до $-0,284$ В соответственно. Во всех случаях наблюдалось значительное повышение однородности распределения поверхностного потенциала, что видно по уменьшению величины разброса регистрируемых значений КРП. С учетом данных

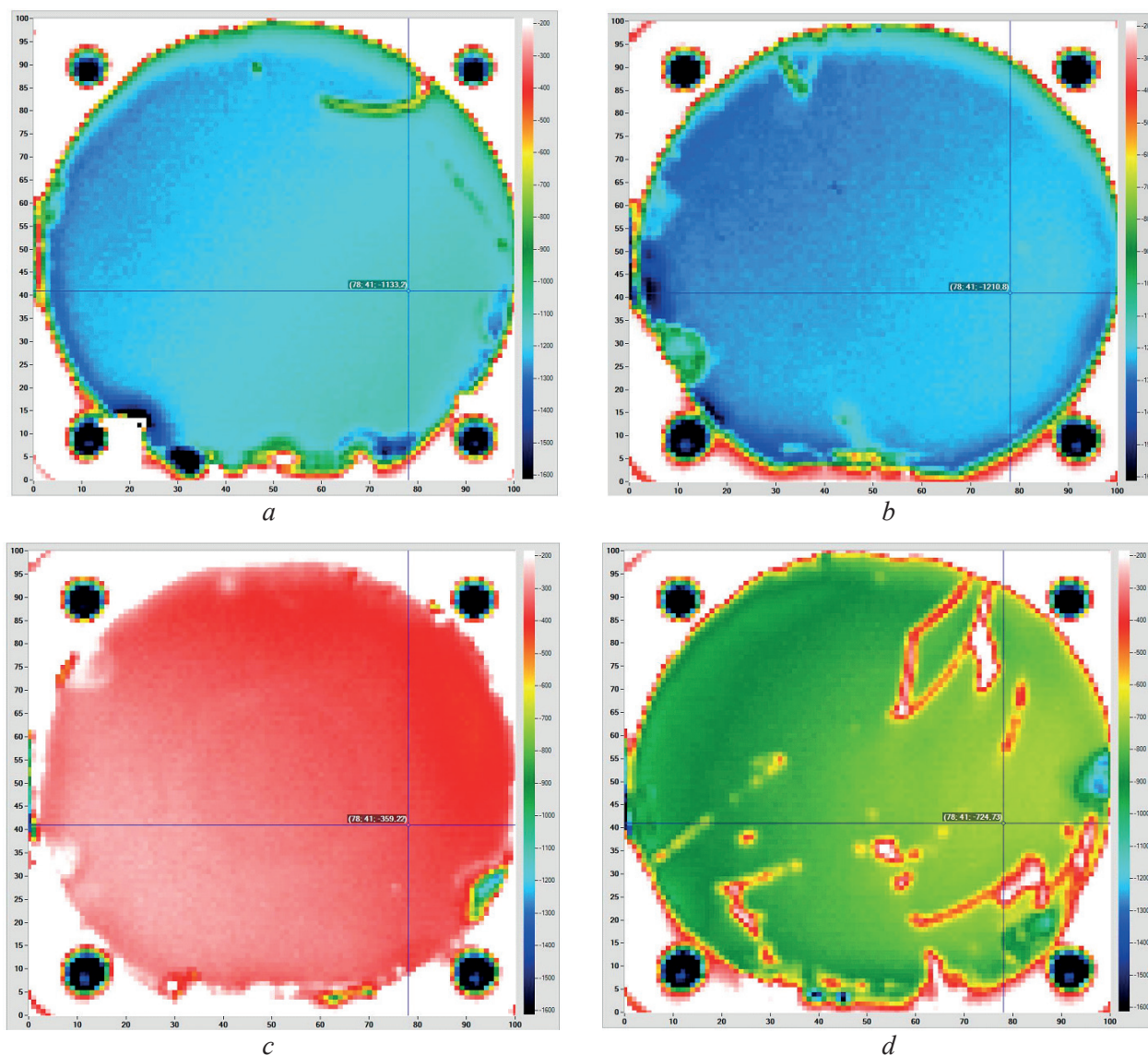


Рисунок 4 – Распределение поверхностного потенциала в системе $\text{SiO}_2\text{-Si}$ по площади пластины после быстрой термообработки на пластинах кремния с предварительной быстрой термообработкой и без нее: *a* – для кремния КЭФ 4,5 без обработки; *b* – для кремния КЭФ 4,5 с обработкой; *c* – для кремния КДБ 12 без обработки; *d* – для кремния КДБ 12 с обработкой

Figure 4 – Surface potential distribution in $\text{SiO}_2\text{-Si}$ structure after rapid thermal treatment for previously treated wafers and non-treated ones: *a* – non-treated KEF 4,5 silicon wafer; *b* – treated KEF 4,5 silicon wafer; *c* – non-treated KDB 12 silicon wafer; *d* – treated KDB 12 silicon wafer

результатов можно утверждать о существенном улучшении свойств границы раздела кремний-двуокись кремния после быстрой термообработки такой системы за счет значительного повышения однородности микроструктуры двуокиси кремния по всей ее толщине.

Анализ пробивных напряжений и токов утечки двуокиси кремния показал, что на пластинах, не проходивших быструю термообработку, пробивное напряжение меньше, а ток утечки выше, чем у пленки на пластинах, проходивших такую обработку (таблица 2). В таблице также приве-

дено сопоставление полученных результатов с величинами плотности заряда на границе раздела кремний-двуокись кремния, определенными путем анализа вольт-фарадных характеристик. Из данных таблицы следует, что проведение быстрой термообработки приводит к уменьшению плотности заряда на границе раздела кремний-двуокись кремния от 2,6 до 3,7 раза для кремния КЭФ 4,5 и от 3,2 до 4,3 раза для кремния КДБ 12. При этом изменение КРП составляет порядка плюс 1,0 В для кремния КЭФ 4,5 и от плюс 0,08 В до плюс 0,5 В для кремния КДБ 12.

Таблица 2 / Table / 2

Параметры двуокиси кремния, выращенной на кремнии с предварительной быстрой термообработкой и без нее
Properties of silicon dioxide layers grown after preliminary rapid thermal treatment and without preliminary treatment

Параметры двуокиси кремния Silicon dioxide properties	Тип пластины Wafer type				
	КЭФ 4,5 KEF 4,5		КДБ 12 KDB 12		
	Без обработки Non-treated	С обработкой Treated	Без обработки Non-treated	С обработкой Treated	
Толщина пленки, нм Layer thickness, nm	48,1	48,1	48,4	48,5	
Пробивное напряжение, В Breakdown voltage, V	51,83	53,58	60,5	60,9	
Ток утечки, нА (при напряжении 20 В) Leakage current, nA (at 20 V voltage)	0,622	0,536	0,712	0,590	
КРП, В CPD, V	Исходное Initial	–1,211	–1,134	–0,725	–0,359
	После обработки After treatment	–0,215	–0,052	–0,210	–0,284
Плотность заряда, см ^{–2} Charge density, cm ^{–2}	Исходное Initial	5,26·10 ¹⁰	3,41·10 ¹⁰	3,80·10 ¹¹	3,52·10 ¹¹
	После обработки After treatment	1,43·10 ¹⁰	1,33·10 ¹⁰	1,16·10 ¹¹	8,16·10 ¹⁰

Видно, что во всех случаях повышение регистрируемых значений КРП поверхности коррелирует с уменьшением плотности заряда на границе раздела кремний-двуокись кремния. В то же время установить однозначную взаимосвязь абсолютной величины изменения КРП с величиной относительного или абсолютного изменения плотности заряда по полученным данным не представляется возможным. Данная неоднозначность может быть объяснена многофакторностью параметра КРП, определяемого, как следует из характеристики метода, не только плотностью заряда на границе раздела, но и в целом характеристиками дефектности границы раздела (наличием и плотностью дислокаций, толщиной нарушенного слоя и др.), влияющими на локальные значения РВЭ поверхности полупроводниковой пластины [18–20]. Таким образом, исследования пространственного распределения поверхностного потенциала дают качественную оценку изменения плотности заряда на границе раздела

кремний-двуокись кремния, обеспечивают пространственную локализацию изменений зарядовых состояний, но не позволяют количественно определить величину данного изменения.

В целом полученные результаты говорят о значительном улучшении состояния границы раздела системы кремний-двуокись кремния, полученной его пироженным окислением, после быстрой термообработки. Уменьшению плотностей фиксированного заряда и быстрых поверхностных состояний при быстрой термической обработке может способствовать фотоионизация и ускорение процессов диффузии под воздействием светового потока, приводящие к уменьшению концентрации межузельных атомов кремния вблизи межфазной границы раздела [10]. Кроме того, такая обработка интенсифицирует процессы замены гидроксильных ионов мостиковыми ионами кислорода с высвобождением некоторого количества водорода. Снижение фиксированного заряда и плотности быстрых поверхностных

состояний при отжиге в неактивной среде также может быть обусловлено вышеуказанными причинами в условиях отсутствия генерации межузельных атомов кремния, что уменьшает их концентрацию вблизи межфазной границы раздела с увеличениями температуры и времени отжига [18, 19].

Учитывая наличие большого разброса от пластины к пластине глубины нарушенного слоя на их рабочей поверхности, которая, по данным проведенных исследований, лежит в пределах от 3 до 100 нм, следует ожидать значительных изменений при термическом окислении таких пластин толщины поверхностного слоя двуокиси кремния с нарушенной микроструктурой. Это должно приводить к низкой воспроизводимости заряда на границе раздела кремний-двуокись кремния, что и имеет место на практике. Наглядно данный эффект можно наблюдать на приведенных на рисунках 5a и 5c картах распределения поверхностного потенциала, характеризующихся большим разбросом значений КРП по поверхности пластины. Проведение быстрой термической обработки исходных кремниевых пластин и пленок двуокиси кремния, выращенных на их поверхности, позволяет значительно стабилизировать зарядовые свойства границы раздела такой системы из-за уменьшения глубины нарушенного слоя в исходных кремниевых пластинах и совершенствования структуры выращенных пленок. Это также приводит к уменьшению разброса значений КРП поверхности, наблюдаемому на рисунках 5b и 5d.

Такое поведение заряда на границе раздела кремний-двуокись кремния обуславливается следующими причинами. Известно, что при термическом окислении в двуокиси кремния формируется положительный фиксированный заряд, не зависящий от приложенного потенциала, а также заряд быстрых поверхностных состояний, изменяющийся под его действием [21]. Величина этих зарядов во многом определяется температурой и средой при окислении кремния. При уменьшении температуры окисления, что имеет место в нашем случае, данные заряды растут, а при последующих отжигах уменьшаются, образуя треугольник Дила. При этом поверхностные состояния локализованы непосредственно на границе раздела SiO_2 -Si и обусловлены оборванными связями кремния и представляют собой атом кремния на границе раздела с неспаренным электроном sp^3 -гибридной орбитали, связанный с тремя атомами кремния $\text{Si}_3 \equiv \text{Si}$ [21, 22]. Их образование

обусловлено несоответствием кристаллических структур Si и SiO_2 . За образование фиксированного заряда при термическом окислении отвечают межузельные атомы кремния в двуокиси кремния. Величина заряда определяется количеством однократно ионизованных межузельных атомов кремния вблизи межфазной границы, которые оказываются там за счет их генерации на данной границе и диффузии вглубь окисла. Согласно представленному механизму образования заряда, уменьшение фиксированного заряда и плотности быстрых поверхностных состояний с ростом температуры процесса окисления связано с увеличениями коэффициента диффузии межузельных атомов кремния и их последующей рекомбинации на межфазной границе, преобладающими над скоростью генерации межузельных атомов кремния на данной границей.

Все это позволяют утверждать, что заряд сосредоточен как в слое двуокиси кремния с нарушенной микроструктурой, т.е. в верхней части подзатворного диэлектрика, так и в остальном объеме диэлектрика, в том числе и на границе раздела кремний-двуокись кремния (рисунок 5).

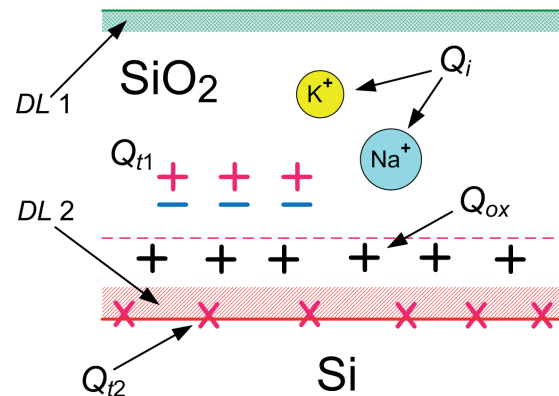


Рисунок 5 – Типы зарядов в системе кремний-оксид кремния: DL 1 – поврежденный слой SiO_2 ; DL 2 – поврежденный слой Si; Q_i – подвижный ионный заряд; Q_{ox} – фиксированный заряд в окисле; Q_{t1} – заряд на ловушках в окисле; Q_{t2} – заряд на ловушках на границе раздела

Figure 5 – Charge types in Si-SiO₂ structure: DL 1 – damaged SiO₂ layer; DL 2 – damaged Si layer; Q_i – mobile ion charge; Q_{ox} – fixed oxide charge; Q_{t1} – trapped oxide charge; Q_{t2} – interface oxide charge

Это утверждение основано на том, что нарушенный слой на рабочей стороне пластины приводит к образованию в верхней части растущего слоя двуокиси кремния нарушенной микроструктуры, которая практически отсутствует у пластин

с предварительной быстрой термообработкой. Поскольку слои двуокиси кремния, выращенные на этих пластинах, не подвергались какому-либо дополнительному воздействию, то все их отличие состоит в наличии или отсутствии в их структуре верхнего слоя с нарушенной микроструктурой, которая влияет на все выше приведенные электрофизические параметры двуокиси кремния. Однако необходимо учитывать, что из-за низкой температуры окисления кремния зарядовые свойства такой системы во многом будут определяться данным фактором, т.е. величина заряда в значительной степени будет зависеть от структуры остального объема двуокиси кремния и состояния его границы с кремнием.

Анализ результатов, приведенных в таблицах 1 и 2, также показывает, что значения пробивных напряжений и токов утечки на пластинах КДБ 12 отличаются от аналогичных величин на пластинах КЭФ 4,5. Как видно, напряжение пробоя двуокиси кремния и ток утечки на пластинах КДБ 12 выше, чем на пластинах КЭФ 4,5. Такое поведение данных параметров связано с образованием заряда в двуокиси кремния, который для пластин КДБ 12 на порядок выше, чем заряд в двуокиси кремния на пластинах КЭФ 4,5. Это вызывает образование инверсного слоя в кремнии в случае пластин КДБ 12 (рисунок 2), приводя к дополнительному падению на нем приложенного напряжения, величина которого при пробое диэлектрика должна достигнуть значения лавинного пробоя инверсного слоя, тем самым увеличивая напряжение пробоя диэлектрика. Наличие такого заряда также обуславливает по сравнению с диэлектриком на пластинах КЭФ 4,5 более высокие токи утечки.

В случае двуокиси кремния на пластинах КЭФ 4,5 возникающий заряд приводит к обогащению кремния отрицательными носителями заряда, приводящими к увеличению их концентрации на границе раздела, вызывая тем самым увеличение электрического поля в диэлектрике. Возникающий при этом заряд на порядок ниже, чем для кремния *p*-типа проводимости, и не вызывает инверсию типа проводимости подложки. Однако накопление положительного заряда в двуокиси кремния создает дополнительное электрическое поле на границе с кремнием, вызывая уменьшение ширины потенциального барьера и тем самым снижая напряжение пробоя.

Изменение поверхностного потенциала по площади пластины соответствует изменению

работы выхода электронов с поверхности, а следовательно, позволяет говорить об изменении структуры поверхностного слоя в полупроводниковой структуре. Учитывая результаты по напряжению плоских зон и плотности заряда, можно утверждать, что качество границы раздела в этом случае выше, чем на пластинах без обработки. Поскольку на границу раздела двуокись кремния-кремний оказывает влияние, в том числе, плотность заряда, находящегося в верхней части диэлектрической пленки, где имеет место нарушение ее микроструктуры, то для формирования качественной границы раздела необходимо создавать слои двуокиси кремния с высокой однородностью микроструктуры по всей толщине. В противном случае это будет приводить к низкой воспроизводимости порогового напряжения МОП и КМОП транзисторов, а также высоты барьера Шоттки.

Таким образом, проведение предварительной быстрой термообработки исходных кремниевых пластин позволяет значительно улучшить электрофизические параметры выращиваемых на их поверхности слоев двуокиси кремния, а именно: увеличить пробивное напряжение на 3–5 %, уменьшить ток утечки в 3,75 раза, снизить заряд на границе раздела кремний-двуокись кремния в 1,5 раза, уменьшить напряжение плоских зон на 3–5 %, уменьшить разброс по площади пластины величины поверхностного потенциала в системе кремний-двуокись кремния. Зависимость напряжения пробоя слоев двуокиси кремния, выращенных пирогенным окислением, от типа проводимости кремния обусловлена образованием инверсного слоя на границе раздела полупроводник-диэлектрик для кремния *p*-типа проводимости и обогащением поверхностного слоя кремния электронами для *n*-типа. Скачкообразное увеличение емкости для кремния *p*-типа проводимости в области перехода от обеднения к инверсии при определенном пороговом напряжении обусловлено изменением эффективного заряда за счет дрейфа ионов гидроксильных групп и водорода к границе раздела кремний-двуокись кремния под воздействием положительного потенциала.

Заключение

Показано, что результаты исследования пространственного распределения поверхностного потенциала структуры кремний-двуокись кремния на основе бесконтактного неразрушающего

метода сканирующего зонда Кельвина хорошо согласуются с данными исследования традиционными контактными методами плотности заряда на границе раздела кремний-двуокись кремния, пробивных напряжений и токов утечки структуры в рамках существующих теоретических моделей. Изменение регистрируемых значений поверхностного потенциала качественно отражает изменение плотности заряда на границе раздела кремний-двуокись кремния в процессе технологической обработки полупроводниковых пластин.

Результаты исследования продемонстрировали отсутствие однозначной количественной взаимосвязи поверхностного потенциала структуры кремний-диэлектрик с плотностью заряда на границе раздела кремний-двуокись кремния при наличии качественной взаимосвязи данных параметров. Существенное влияние на величину поверхностного потенциала оказывают дефекты границы раздела, в частности толщина поверхностного слоя двуокиси кремния с нарушенной микроструктурой.

Предварительная быстрая термообработка исходных кремниевых пластин приводит к увеличению структурного совершенства их рабочей поверхности за счет уменьшения глубины нарушенного слоя, позволяет улучшить электрофизические параметры выращиваемых на их поверхности слоев двуокиси кремния, а именно: увеличить пробивное напряжение, уменьшить ток утечки, снизить заряд на границе раздела кремний-двуокись кремния, уменьшить напряжение плоских зон, снизить разброс и величину поверхностного потенциала в системе кремний-двуокись кремния по площади пластины.

Неоднородности распределения поверхностного потенциала наглядно отражают неоднородности распределения толщины нарушенного в процессе окисления слоя по поверхности пластины и позволяют выявить места локализации дефектов, связанных с нарушением структуры полупроводника у границы раздела кремний-двуокись кремния.

Таким образом, в существующем виде методы зондовой электрометрии являются эффективным дополнением традиционных методов контроля полупроводниковых структур, обеспечивая получение ранее недоступной информации о зарядовом состоянии и распределении дефектов диэлектрического слоя до и после технологических операций не только в виде обобщенной оценки

величины электрофизических параметров, но и в виде карт пространственного распределения данных параметров по поверхности пластины, что не обеспечивается традиционными методами контроля.

Список использованных источников

1. *Schroder, D.K.* Semiconductor Material and Device Characterization / D.K. Schroder // Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, Inc. – 2006. – 790 p.

doi: 10.1002/0471749095

2. *Schroder, D.K.* Trends in Lifetime Measurements / D.K. Schroder // Electrochemical Society Proceedings. – 2000. – Vol. 17. – P. 365–383.

3. *Everaert, J.L.* Contactless Mobility Measurements of Inversion Charge Carriers on Silicon Substrates with SiO₂ and HfO₂ Gate Dielectrics / J.L. Everaert [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 2010. – Vol. 96. – P. 122906.

doi: 10.1063/1.3373920

4. *Oborina, E.I.* Noncontact interface trap determination of SiO₂-4H-SiC structures / E.I. Oborina, A.M. Hoff // J. Appl. Phys. – 2010. – Vol. 107. – P. 013703.

doi: 10.1063/1.3272081

5. *Schroder, D.K.* Contactless Surface Charge Semiconductor Characterization / D.K. Schroder // Materials Science and Engineering: B. – 2002. – Vol. 91–92. – P. 196 – 210. doi: 10.1016/S0921-5107(01)00993-X

6. *Schroder, D.K.* Silicon Epitaxial Layer Recombination and Generation Lifetime Characterization / D.K. Schroder [et al.] // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2003. – Vol. 50, no. 4. – P. 906–912.

doi: 10.1109/TED.2003.812488

7. *Komin, V.V.* Status of Non-contact Electrical Measurements / V.V. Komin, A.F. Bello, C.R. Brundle, Y.S. Uritsky // AIP Conference Proceedings. – 2003. – Vol. 683. – P. 782–795.

doi: 10.1063/1.1622559

8. *Воробей, П.И.* Контроль дефектов структуры кремний-диэлектрик на основе анализа пространственного распределения потенциала по поверхности полупроводниковых пластин / П.И. Воробей [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2013. – № 2(7). – С. 67–72.

9. *Pogosov, V.V.* Effect of deformation on surface characteristics of finite metallic crystals / V.V. Pogosov, O.M. Shtepa // Ukr. J. Phys. – 2002. – Vol. 47, no. 11. – P. 1065–1070.

10. *Nazarov, A.* Application of Volta potential mapping to determine metal surface defects / A. Nazarov, D. Thierry // Electrochimica Acta. – 2007. – Vol. 52. – P. 7689–7696. doi: 10.1016/j.electacta.2007.05.077

11. *Neaton, J.B.* Electronic properties of the Si/SiO₂ interface from first principles / J.B. Neaton, D.A. Muller, N.W. Ashcroft // Phys. Rev. Lett. – 2000. – Vol. 85, No. 6. – P. 1298–1301.

12. Технология СБИС : в 2 т. / под ред. С. Зи. – М. : Мир, 1984. – Т. 1. – 405 с.
13. Zharkikh, Yu.S. Mechanic-electrical transformations in the Kelvin method / Yu.S. Zharkikh, S.V. Lysochenko // *Applied Surface Science*. – 2017. – Vol. 400. – P. 71–76. doi:10.1016/j.apsusc.2016.12.085
14. Тявловский, А.К. Математическое моделирование дистанционной зависимости разрешающей способности сканирующего зонда Кельвина / А.К. Тявловский // *Приборы и методы измерений*. – 2012. – № 1(4). – С. 30–36.
15. Gorban, A.P. Investigation of the fast surface state spectrum of MIS structures by differential C-V method / A.P. Gorban, V.G. Litovchenko, P.Ch. Peikow // *Phys. State Sol. (a)*. – 1972. – Vol. 10, no. 1. – P. 289–292.
16. Горлов, М.И. Технологические отбраковочные и диагностические испытания полупроводниковых изделий / М.И. Горлов, В.А. Емельянов, Д.Л. Ануфриев. – Минск : Бел. наука, 2006. – 367 с.
17. Боброва, Е.А. Особенности вольт-фарадных характеристик МОП структур, обусловленные зарядом в окисле / Е.А. Боброва, Н.М. Омеляновская // *ФТП*. – 2008. – Т. 42, вып. 11. – С. 1380–1383.
18. Александров, О.В. Модель образования фиксированного заряда в термическом диоксиде кремния / О.В. Александров, А.И. Дусь // *ФТП*. – 2011. – Т. 45, вып. 4. – С. 474–480.
19. Herbert, G. Origin of the fixed charge in thermally oxidized silicon / G. Herbert // *J. Electrochem. Soc.* – 1977. – Vol. 124, no. 2. – P. 314–317.
20. Holiney, R.Yu. Investigation of the undersurface damaged layers in silicon wafers / R.Yu. Holiney, L.A. Matveeva, E.F. Venger // *Semiconductor phys., quantum electronics and optoelectronics*. – 1999. – Vol. 2, no. 4. – P. 10–12.
21. Хатько, В.В. Структуры металл-диоксид кремния-полупроводник для интегральных микросхем / В.В. Хатько. – Минск : БНТУ, 2009. – 234 с.
22. Румак, Н.В. Диэлектрические пленки в твердотельной микроэлектронике / Н.В. Румак, В.В. Хатько. – Минск : Навука і тэхніка, 1990. – 192 с.
4. Oborina E.I., Hoff A.M. Noncontact interface trap determination of SiO₂-4H-SiC structures. *J. Appl. Phys.*, 2010, vol.107, pp. 013703. doi: 10.1063/1.3272081
5. Schroder D.K. Contactless Surface Charge Semiconductor Characterization. *Materials Science and Engineering: B*, 2002, vol. 91–92, pp. 196–210. doi: 10.1016/S0921-5107(01)00993-X
6. Schroder D.K., Choi B.D., Kang S.G., Ohashi W., Kitahara K., Opposits G., Pavelka T., Benton J. Silicon Epitaxial Layer Recombination and Generation Lifetime Characterization. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2003, vol. 50, no. 4, pp. 906–912. doi: 10.1109/TED.2003.812488
7. Komin V.V., Bello A.F., Brundle C.R., Uritsky Y.S. Status of Non-contact Electrical Measurements. *AIP Conference Proceedings*, 2003, vol. 683, pp. 782–795. doi: 10.1063/1.1622559
8. Vorobey R.I., Zharin A.L., Gusev O.K., Petlitsky A.N., Pilipenko V.A., Turtsevitch A.S., Tyavlovsky A.K., Tyavlovsky K.L. [Study of silicon-insulator structure defects based on analysis of a spatial distribution of a semiconductor wafers' surface potential]. *Devices and Methods of Measurements*, 2013, no. 2(7), pp. 67–72 (in Russian).
9. Pogosov V.V., Shtepa O.M. Effect of deformation on surface characteristics of finite metal-lic crystals. *Ukr. J. Phys.*, 2002, vol. 47, no. 11, pp. 1065–1070.
10. Nazarov A., Thierry D. Application of Volta potential mapping to determine metal surface defects. *Electrochimica Acta*, 2007, vol. 52, pp. 7689–7696. doi: 10.1016/j.electacta.2007.05.077
11. Neaton J.B., Muller D.A., Ashcroft N.W. Electronic properties of the Si/SiO₂ interface from first principles. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, vol. 85, no. 6, pp. 1298–1301.
12. Cze S. [SBIC technology]. Vol. 1. Mir Publ., Moscow, 1984, 405 p. (in Russian).
13. Zharkikh Yu.S., Lysochenko S.V. Mechanic-electrical transformations in the Kelvin method. *Applied Surface Science*, 2017, vol. 400, pp. 71–76. doi: 10.1016/j.apsusc.2016.12.085
14. Tyavlovsky A.K. [Mathematical modeling of a distance dependence of a scanning Kelvin probe lateral resolution]. *Devices and Methods of Measurements*, 2012, no. 1(4), pp. 30–36 (in Russian).
15. Gorban A.P., Litovchenko V.G., Peikow P.Ch. Investigation of the fast surface state spectrum of MIS structures by differential C-V method. *Phys. State Sol. (a)*, 1972, vol. 10, no. 1, pp. 289–292.
16. Gorlov M.I., Yemelyanov V.A., Anufriev D.L. [Technological rejection and diagnostic tests of semiconductor production]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2006, 367 p. (in Russian).
17. Bobrova Ye.A., Omelyanovskaya N.M. [MOS structures capacitance-voltage characteristics peculiarities due to oxide charge]. *Fizika i Technika Poluprovodnikov*, 2008, vol. 42, iss. 11, pp. 1380–1383 (in Russian).

References

1. Schroder D.K. Semiconductor Material and Device Characterization. / Hoboken, New Jersey, John Wiley and Sons, Inc., 2006, 790 p. doi: 10.1002/0471749095
2. Schroder D.K. Trends in Lifetime Measurements. *Electrochemical Society Proceedings*, 2000, vol. 17, pp. 365–383.
3. Everaert J.L., Rosseel E., Dekoster J., Pap A., Meszaros A., Kis-Szabo K., Pavelka T. Con-tactless Mobility Measurements of Inversion Charge Carriers on Silicon Substrates with SiO₂ and HfO₂ Gate Dielectrics. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, vol. 96, pp. 122906. doi: 10.1063/1.3373920

18. Alexandrov O.V., Dus' A.I. [Model of fixed charge formation in thermal silicon dioxide]. *Fizika i Technika Poluprovodnikov*, 2011, vol. 45, iss. 4, pp. 474–480 (in Russian).

19. Herbert G. Origin of the fixed charge in thermally oxidized silicon. *J. Electrochem. Soc.*, 1977, vol. 124, no. 2, pp. 314–317.

20. Holiney R.Yu., Matveeva L.A., Venger E.F. Investigation of the undersurface damaged layers in

silicon wafers. *Semiconductor phys., quantum electronics and optoelectronics*, 1999, vol. 2, no. 4, pp. 10–12.

21. Khatko V.V. *Struktury metal-dioksid kremniya-poluprovodnik dlya integral'nykh mikroskhem* [Metal-silicon dioxide-semiconductor structures for integrated circuits]. Minsk, BNTU Publ., 2009, 234 p. (in Russian).

22. Rumak N.V., Khatko V.V. [Dielectric films in solid-state microelectronics]. Minsk, Navuka i tehnika Publ., 1990, 192 p. (in Russian).