
ФИЗИКА И ТЕХНИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

SEMICONDUCTOR PHYSICS AND ENGINEERING

УДК 621.382

ЗАРЯДОВЫЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПОДЗАТВОРНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ БЫСТРОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ

Н. С. КОВАЛЬЧУК¹⁾, Ю. А. МАРУДО¹⁾, А. А. ОМЕЛЬЧЕНКО¹⁾,
В. А. ПИЛИПЕНКО¹⁾, В. А. СОЛОДУХА¹⁾, С. А. ДЕМИДОВИЧ¹⁾,
В. В. КОЛОС¹⁾, В. М. АНИЩИК²⁾, В. А. ФИЛИПЕНЯ¹⁾, Д. В. ШЕСТОВСКИЙ¹⁾

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

²⁾ Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Исследованы зарядовые свойства полученных методом быстрой термообработки (БТО) тонких слоев диэлектриков и их границы раздела с кремнием для МОП-транзисторов. Формирование слоев производилось двух- либо трехстадийным процессом БТО с аналогичными для каждой стадии режимами фотонной обработки (длительность – 12 с, максимальная температура – 1250 °С). Установлено, что у оксидов затвора, полученных двухстадийным процессом БТО в атмосфере кислорода, после проведения третьей стадии обработки в атмосфере азота происходят частичная ликвидация дефектов, ответственных за локальные зарядовые центры, и рост относительного значения поверхностного потенциала в среднем на 100 отн. ед. Ликвидация дефектов является следствием перестройки структуры диэлектрика и его границы с кремнием, а также диффузии атомов кислорода и кремния вдоль границ раздела слоя изолятора. Для образцов, полученных двухстадийным процессом БТО в атмосфере кислорода, после проведения третьей стадии обработки в формовочном газе наблюдаются практически полная ликвидация локальных зарядовых центров и рост относительной величины поверхностного потенциала в среднем на 300 отн. ед. В данном случае, помимо процессов, происходящих при обработке SiO₂ методом БТО в атмосфере азота, ликвидацию зарядовых центров обуславливает пассивация дефектов атомами водорода.

Ключевые слова: подзатворный диэлектрик; быстрая термообработка; трехстадийный процесс; поверхностный потенциал.

Образец цитирования:

Ковальчук НС, Марудо ЮА, Омельченко АА, Пилипенко ВА, Солодуха ВА, Демидович СА, Колос ВВ, Анищик ВМ, Филипеня ВА, Шестовский ДВ. Зарядовые свойства тонких подзатворных диэлектриков, полученных методом быстрой термообработки. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика.* 2022;1:80–87.
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2022-1-80-87>

For citation:

Kovalchuk NS, Marudo YA, Omelchenko AA, Pilipenko VA, Saladukha VA, Demidovich SA, Kolos VV, Anishchik VM, Filipenia VA, Shestovski DV. Charging properties of thin gate dielectrics, obtained by the method of rapid thermal processing. *Journal of the Belarusian State University. Physics.* 2022;1:80–87. Russian.
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2022-1-80-87>

Сведения об авторах см. на с. 86–87.

Information about the authors see p. 86–87.

CHARGING PROPERTIES OF THIN GATE DIELECTRICS, OBTAINED BY THE METHOD OF RAPID THERMAL PROCESSING

N. S. KOVALCHUK^a, Y. A. MARUDO^a, A. A. OMELCHENKO^a,
U. A. PILIPENKA^a, V. A. SALADUKHA^a, S. A. DEMIDOVICH^a,
V. V. KOLOS^a, V. M. ANISHCHIK^b, V. A. FILIPENIA^a, D. V. SHESTOVSKI^a

^a«Integral» – Holding Management Company, 121A Kazinka Street, Minsk 220108, Belarus

^bBelarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Corresponding author: D. V. Shestovski (dshestovski@integral.by)

The charge properties of thin dielectrics, obtained by rapid thermal processing (RTP), and their interfaces with silicon for MOS transistors are investigated. The production of insulator layers was carried out by a two- or three-stage RTP with photon processing regimes similar for each stage (duration – 12 s, maximum temperature – 1250 °C). After the third stage of RTP in a nitrogen atmosphere of the gate oxides, obtained by a two-stage process in oxygen atmosphere, the defects responsible for local charge centers are partially eliminated. There is also an increase in the relative value of the surface potential by an average of 100 relative units. The elimination of defects is a consequence of the rearrangement of the structure of the dielectric, its interface with silicon, and the diffusion of oxygen and silicon atoms along the interface of the insulator layer. For samples obtained by a two-stage RTP in an oxygen atmosphere and subjected to the third stage of processing in a forming gas, there is an almost complete elimination of local charge centers and an increase in the relative value of the surface potential by an average of 300 relative units. In this case, in addition to the processes occurring during the treatment of SiO₂ by the RTP method in an nitrogen atmosphere, the liquidation of charge centers is a consequence of the passivation of defects by hydrogen atoms.

Keywords: gate dielectric; rapid thermal processing; three-stage process; surface potential.

Введение

В связи с непрерывным совершенствованием номенклатуры изделий интегральной электроники к эксплуатационным параметрам кремниевых цифровых интегральных схем (ИС) [1; 2], основой логических элементов которых выступают МОП-транзисторы, предъявляются все более высокие требования. Наличие структурных дефектов как на границе раздела Si – SiO₂, так и в оксиде кремния приводит к образованию соответствующих им локализованных зарядовых центров, что оказывает негативное влияние на функциональные параметры транзисторов с изолированным затвором [3; 4].

Согласно [5] зарядовые свойства тонких пленок SiO₂, полученных методом быстрой термообработки (БТО), превосходят зарядовые свойства термических оксидов кремния, полученных в термодиффузионных печах. Однако стандартная длительность процесса БТО составляет от 60 до 170 с, при этом отсутствует возможность проведения групповых операций сразу для нескольких пластин [5; 6]. Эти факторы делают затруднительным применение предлагаемого процесса на высокопроизводительных участках крупносерийного производства.

Одними из способов улучшения электрофизических характеристик тонких пленок SiO₂ затвора являются азотирование их методом ионной имплантации и нитрирование в азотсодержащих средах (NO, N₂O или NH₃) [7]. Ввиду невысокой стоимости и широкого практического применения азота в электронной промышленности интерес представляет процесс азотирования SiO₂ в атмосфере азота.

В настоящей статье были исследованы зарядовые свойства тонких диэлектриков затвора, полученных методом БТО в ходе фотонной обработки секундной длительности, и их границ раздела с кремнием для МДП-структур ИС.

Материалы и методы исследования

В качестве исходных образцов применялись пластины *n*-типа монокристаллического кремния ориентацией <100> с удельным сопротивлением $\rho = 4,5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, легированные фосфором. Перед формированием диэлектриков затвора проводилось предварительное окисление пластин при 1000 °C в атмосфере влажного кислорода (толщина *d* полученного SiO₂ равна 100 нм) в целях ликвидации приповерхностного дефектного слоя. Образование нанометрового дефектного слоя происходит после операций механической обработки (резки, шлифовки и полировки), осуществляемых при изготовлении кремниевых пластин [8; 9]. Затем оксид кремния полностью стравливался в растворе плавиковой кислоты, после чего пластины подвергались химической очистке по технологии компании *Radio Corporation of America* (RCA) согласно методике, приведенной в [10]. Обработка по технологии RCA применялась ввиду ее

высокой эффективности и активного применения в производстве ИС для очистки поверхности пластин от органических соединений, механических частиц, атомов щелочных и переходных металлов, а также для снятия слоя естественного оксида кремния [10; 11].

Получение диэлектриков затвора методом БТО осуществлялось с использованием системы As-Master в стационарной атмосфере кислорода, азота либо формовочного газа (97 % N_2 , 3 % H_2). Непланарная сторона пластин облучалась некогерентным излучением потоками фотонов 20 галогенных ламп с длительностью импульсов 12 с в режиме теплового баланса при атмосферном давлении. Мощность излучения галогенных ламп подбиралась предварительно, исходя из достижения температуры 1250 °С на аналогичных рабочих тестовых пластинах в течение фотонной обработки требуемой длительности. Контроль температуры осуществлялся пирометром, расположенным над центром планарной стороны пластины. По окончании каждой стадии БТО образцы охлаждались до комнатной температуры, последующая стадия проводилась с использованием аналогичных режимов без предварительного извлечения пластин из реактора установки.

Получение топограмм распределения поверхностного потенциала проводилось методом сканирующего зонда Кельвина с пространственным разрешением 1 мм в системе СКАН-2019 в сканирующем режиме согласно методике, описанной в [12].

Результаты и их обсуждение

Ранее было показано [13], что для оксидов затвора, полученных двухстадийным процессом БТО в атмосфере кислорода, характерна меньшая неравномерность толщины диэлектрика (26 %), чем для термических оксидов кремния (32 %). Это свидетельствует о снижении градиента температуры по поверхности пластины в ходе проведения процессов БТО по сравнению с таковым при термическом окислении (рис. 1). После проведения третьей стадии фотонной обработки в формовочном газе неравномерность толщины слоя сформированного диэлектрика составила 22 %, также наблюдалось снижение среднего значения толщины полученного слоя с 10,5 до 9,7 нм.

В [10] установлено, что для диэлектриков, полученных трехстадийным процессом БТО с заключительной обработкой в атмосфере азота либо формовочного газа, значения показателя преломления составляют 1,51 и 1,48 соответственно. Данные значения показателя преломления соответствуют 8 и 4 % массовой доли азота в полученных слоях. По правилу Мотта [14] для $Si_xO_yN_z$, сформированных БТО с третьей стадией обработки в атмосфере азота, расчетные значения индексов – $SiO_{1,72}N_{0,18}$. В диэлектриках, полученных методом БТО с заключительной обработкой в формовочном газе, соотношение атомов составило $SiO_{1,47}N_{0,35}$.

На рис. 2 приведены топограммы распределения потенциала по поверхности пластин. Метод сканирующего зонда Кельвина качественно характеризует зарядовые свойства изолятора (изменения плотности поверхностных состояний на границе раздела, объемный заряд). Для рассматриваемого случая расположение неоднородностей поверхностного потенциала и толщин диэлектриков, полученных методом БТО, не совпадает (см. рис. 1 и 2), причем неравномерность толщин этих слоев не превышает 22–26 %. В связи с этим основное влияние на распределение потенциала будут оказывать качество границы раздела диэлектрик – полупроводник и наличие кулоновских центров в изоляторе.

На топограммах образцов с SiO_2 , полученным двухстадийным процессом БТО в атмосфере кислорода, наблюдаются неоднородности распределения потенциала по краям пластины, а также несколько крупных включений около центра. Наиболее вероятным механизмом образования дефектных областей является формирование диэлектрика на естественном оксиде. Согласно [15] уже после нескольких минут в атмосфере воздуха на идеально чистой поверхности кремниевых пластин будет образовываться слой неупорядоченного естественного оксида кремния толщиной 0,5–0,7 нм. Так, после проведения очистки поверхности пластин (в том числе жидкостными методами травления SiO_2 и обработки по технологии RCA) на ней будут адсорбироваться молекулы кислорода и воды из воздуха [16; 17]. В результате физико-химического взаимодействия этих компонентов с верхними слоями кремниевой пластины формируется слой неупорядоченного естественного оксида кремния [16]. На поверхности пластины также могут локализоваться летучие органические соединения, выделяющиеся из присутствующих в производственных помещениях полимерных материалов и адсорбирующиеся благодаря полярным группам атомов.

Присутствие на кремниевой пластине оксида кремния с неупорядоченной структурой, а также различного рода загрязнений приведет к локальному изменению энергии активации процесса окисления, а значит, и скорости его протекания. В связи с наличием градиента скорости роста по поверхности пластины будет происходить образование неравномерностей толщины, что впоследствии приведет к формированию областей с неупорядоченной структурой в оксиде кремния и на границе раздела Si – SiO_2 .

Согласно [18] в процессе получения подзатворного оксида кремния с применением термодиффузионных печей наличие загрязнений, разного рода дефектов, повышенной шероховатости на поверхности кремния приведет к образованию структурных несовершенств полученной системы Si – SiO₂ в соответствующих им областях.

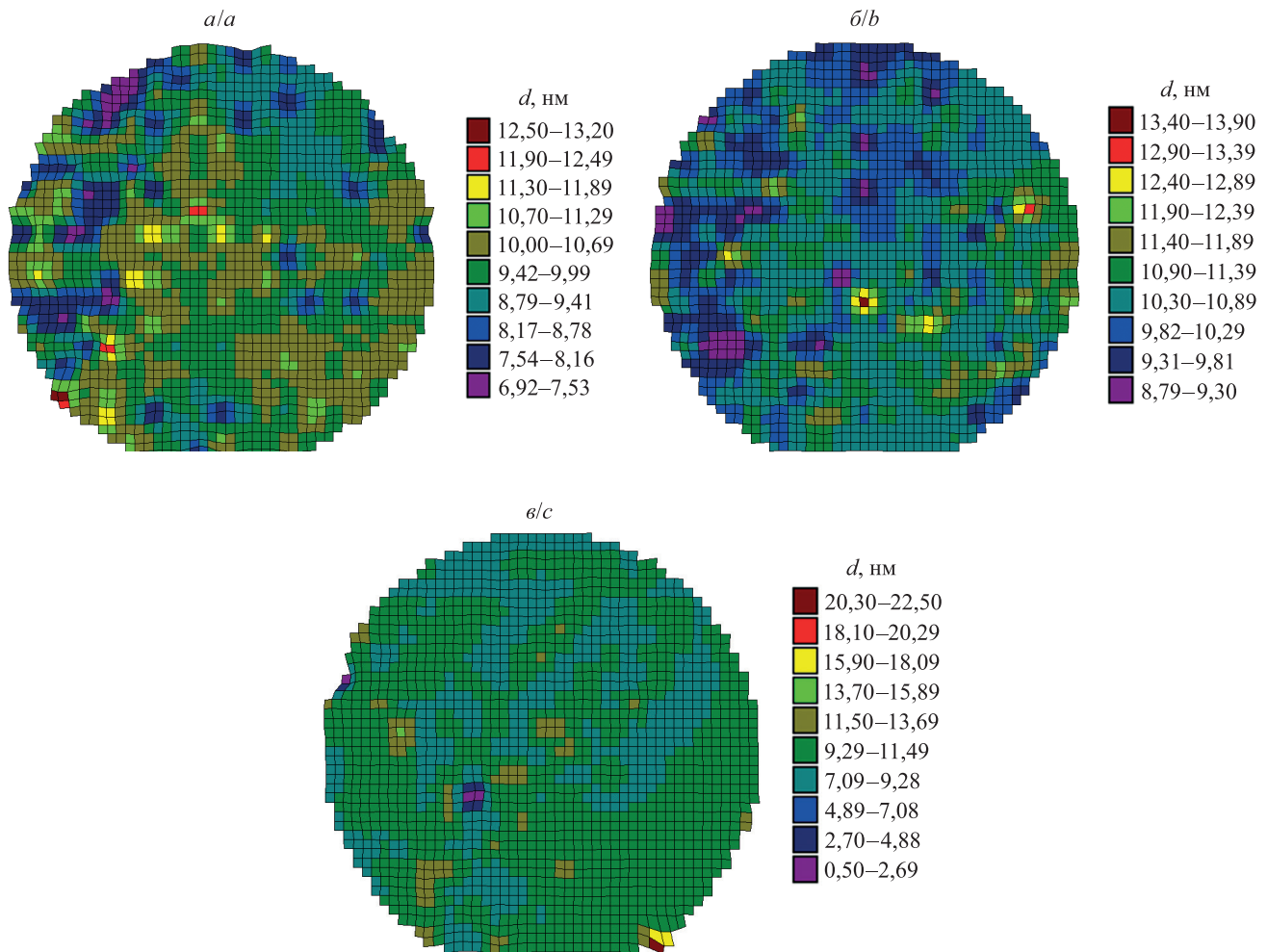


Рис. 1. Топограммы распределения толщин: а – термического SiO₂, полученного при 900 °С в течение 30 мин ($\langle d \rangle = 9,7$ нм); б, в – оксидов, полученных методом БТО в ходе фотонных обработок длительностью 12 с при максимальной температуре 1250 °С (б – двухстадийный процесс в атмосфере O₂ ($\langle d \rangle = 10,5$ нм); в – трехстадийный процесс с двумя обработками в атмосфере O₂ и третьей обработкой в формовочном газе ($\langle d \rangle = 9,7$ нм))

Fig. 1. Topograms of the thickness distribution: а – thermal SiO₂ obtained at 900 °С for 30 min ($\langle d \rangle = 9,7$ nm); б, в – oxides obtained by the RTP method by photonic treatments for 12 s and a maximum temperature of 1250 °С (б – two-stage process in O₂ atmosphere ($\langle d \rangle = 10,5$ nm); в – three-stage process with two treatments in an O₂ atmosphere, the third treatment in a forming gas ($\langle d \rangle = 9,7$ nm))

Применение дополнительной фотонной обработки методом БТО в атмосфере азота к оксиду затвора, полученному двухстадийным процессом, способствует ликвидации большинства включений на топограммах, повышению равномерности и росту значения поверхностного потенциала в среднем на 100 отн. ед. (см. рис. 2, б). Полученные результаты являются следствием снижения концентрации поверхностных состояний на границе раздела диэлектрик – полупроводник и, предположительно, ликвидации части кулоновских центров в изоляторе из-за перестройки системы Si – SiO₂, диффузии атомов кремния и кислорода вдоль границ раздела диэлектрика в процессе третьей стадии БТО. Другим механизмом ликвидации зарядовых центров является частичная пассивации дефектов на границе раздела Si – SiO₂ атомами азота. Для тонких оксидов, подвергнутых фотонной обработке при высокой температуре, вероятно локализация атомов азота на границе раздела Si – SiO₂. При наличии атомов азота в системе Si – SiO₂ будет проходить их локализация вблизи границы раздела Si – SiO₂. Атомы азота, встраиваясь в дефекты структуры на границе раздела, находят себе ниши в соответствии со своим ковалентным радиусом, что приводит к частичной пассивации зарядовых центров поверхностных состояний (в частности, парамагнитных P_{bo}-центров) [19].

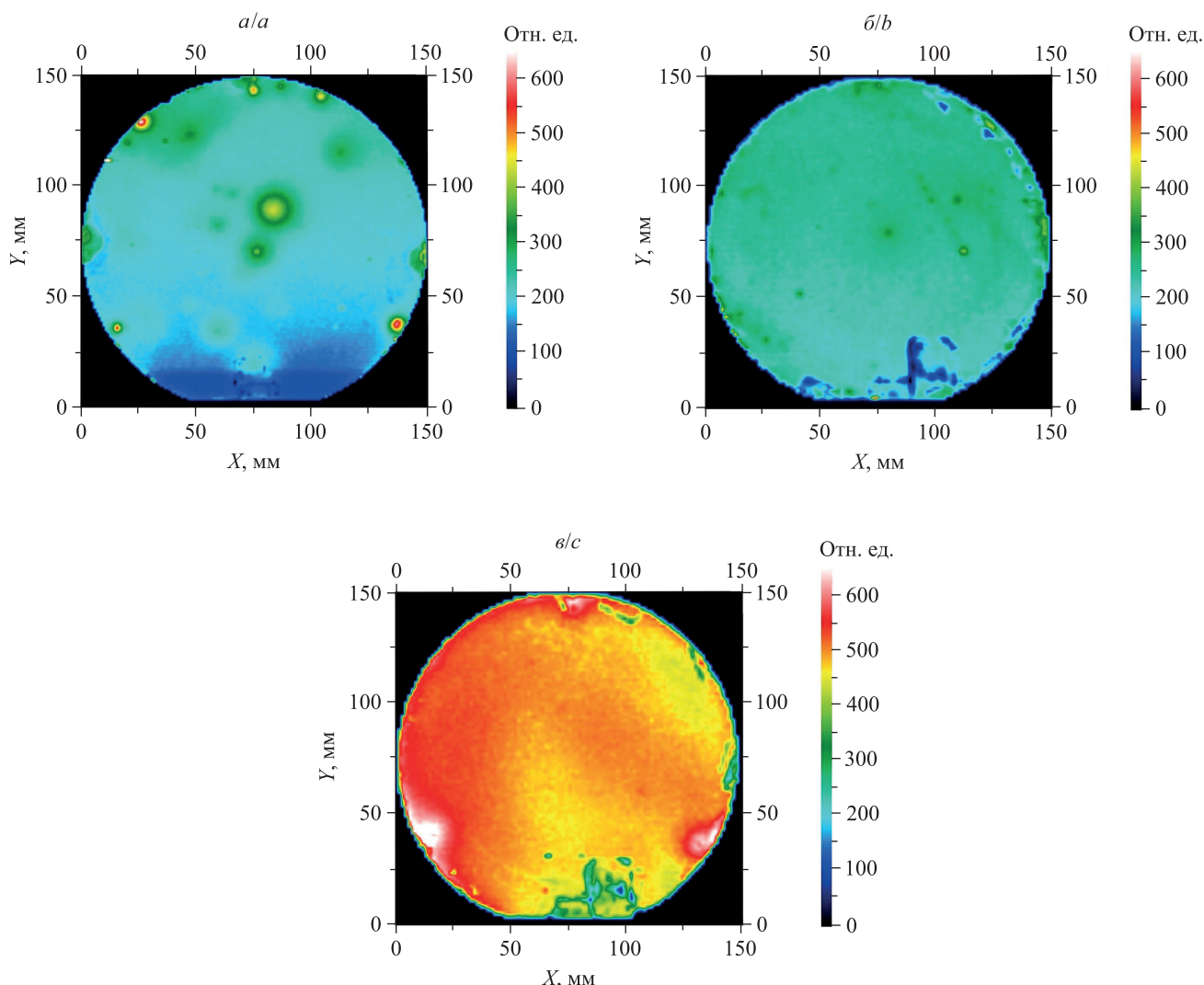


Рис. 2. Топограммы распределения потенциала (в относительных единицах) по поверхности пластин с диэлектриком, полученным методом БТО в ходе фотонных обработок длительностью 12 с при максимальной температуре 1250 °С: *a* – двухстадийный процесс в атмосфере O₂; *б, в* – трехстадийный процесс с двумя обработками в атмосфере O₂ и третьей обработкой в атмосфере N₂ (*б*) либо в формовочном газе (*в*)

Fig. 2. Topograms of the potential distribution (in relative units) over the surface of plates with a dielectric obtained by the RTP method by photonic treatments with a duration of 12 s and a maximum temperature of 1250 °С: *a* – two-stage process in an O₂ atmosphere; *b, c* – three-stage process with two treatments in an O₂ atmosphere, the third treatment in N₂ atmosphere (*b*) or in forming gas (*c*)

Для диэлектриков, полученных трехстадийным процессом БТО с применением заключительной фотонной обработки в формовочном газе, отмечены рост величины поверхностного потенциала в среднем на 300 отн. ед., ликвидация включений на топограммах и повышение равномерности распределения потенциала (см. рис. 2, *в*). За исключением перестройки системы Si – SiO₂ и прямого азотирования, в образцах, полученных с применением обработки в формовочном газе, будут протекать процессы образования гидроксильных групп в системе диэлектрик – полупроводник и, как следствие, инактивация электрически активных центров атомами водорода.

В работе [20] показано, что пассивация поверхностных электрически активных P_{b0}-центров молекулярным водородом становится эффективной при температурах >250 °С. Также установлено, что после отжига в атмосфере с добавлением водорода при 900 °С пластин кремния ориентацией (100) со слоем оксида будет происходить пассивация как дефектов класса P_b, так и других неклассифицированных дефектов в системе Si – SiO₂ [21]. Возможно образование в SiO₂ мостикового водорода Si – H – Si и гидроксильного E'-центра как на границе раздела Si – SiO₂ [21], так и в оксиде [22].

Заключение

Установлено, что для оксидов затвора, полученных методом БТО с двумя стадиями фотонных обработок пластин кремния длительностью 12 с в атмосфере кислорода при максимальной температуре 1250 °С, после проведения третьей стадии обработки в атмосфере азота при аналогичных режимах на топограммах распределения электрического поверхностного потенциала наблюдаются повышение его равномерности и ликвидация включений. Также отмечается рост среднего значения поверхностного потенциала на 100 отн. ед. Это обусловлено снижением концентрации заряженных центров в слое диэлектрика и плотности поверхностных состояний на границе с кремнием вследствие перестройки структуры диэлектрика и границы раздела Si – SiO₂, а также диффузии вдоль границ раздела слоя и по его поверхности атомов кислорода и кремния.

Для оксида, полученного двухстадийным процессом БТО (каждая стадия проводилась с использованием аналогичных указанным выше режимов), после проведения третьей стадии обработки методом БТО в формовочном газе на топограммах распределения поверхностного потенциала наблюдаются значительное повышение равномерности и практически полная ликвидация включений. Возрастает среднее значение поверхностного потенциала на 300 отн. ед. Вместе с аналогичными процессами, протекающими при проведении БТО в атмосфере азота, происходит инактивация атомами водорода как кулоновских центров в диэлектрике, так и поверхностных состояний на границе раздела диэлектрика с кремнием.

Библиографические ссылки

1. Ahopelto J, Ardila G, Baldi L, Balestra F, Belot D, Fagas G, et al. NanoElectronics Roadmap for Europe: from nanodevices and innovative materials to system integration. *Solid-State Electronics*. 2019;155:7–19. DOI: 10.1016/j.sse.2019.03.014.
2. Balestra F. Challenges for high performance and very low power operation at the end of the Roadmap. *Solid-State Electronics*. 2019;155:27–31. DOI: 10.1016/j.sse.2019.03.011.
3. Omura Y, Mallik A, Matsuo N. *MOS devices for low-voltage and low-energy applications*. Singapore: John Wiley & Sons; 2017. 496 p.
4. Deleonibus S, editor. *Electronic device architectures for the nano-CMOS era: from ultimate CMOS scaling to beyond CMOS devices*. Boca Raton: CRC Press; 2009. 426 p.
5. Borisenko VE, Hesketh PJ. *Rapid thermal processing of semiconductors*. New York: Springer Science + Business Media; 1997. XXII, 358 p. (Microdevices: physics and fabrication technologies).
6. Fair RB, editor. *Rapid thermal processing: science and technology*. Boston: Academic Press; 1993. VIII, 430 p.
7. Красников ГЯ. *Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов*. 2-е издание. Москва: Техносфера; 2011. 799 с.
8. Hu GQ, Lu J, Shen JY, Xu XP. Surface characterization of silicon wafers polished by three different methods. *Key Engineering Materials*. 2011;487:233–237. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.487.233.
9. Наливайко ОЮ, Солодуха ВА, Пилипенко ВА, Колос ВВ, Белоус АИ, Липинская ТИ и др. *Базовые технологические процессы изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем на кремнии. Том 1*. Турцевич АС, редактор. Минск: Интегралполиграф; 2013. 703 с.
10. Doering R, Nishi Y, editors. *Handbook of semiconductor manufacturing technology*. 2nd edition. Boca Raton: CRC Press; 2008. 1720 p.
11. Reinhardt KA, Reidy RF, editors. *Handbook for cleaning for semiconductor manufacturing: fundamentals and applications*. Hoboken: John Wiley & Sons; 2011. 614 p. Co-published by the Scrivener Publishing LLC.
12. Пилипенко ВА, Солодуха ВА, Филипеня ВА, Воробей РИ, Гусев ОК, Жарин АЛ и др. Характеризация электрофизических свойств границы раздела кремний – двуокись кремния с использованием методов зондовой электрометрии. *Приборы и методы измерений*. 2017;8(4):344–356.
13. Ковальчук НС, Омельченко АА, Пилипенко ВА, Солодуха ВА, Шестовский ДВ. Формирование подзатворного диэлектрика нанометровой толщины методом быстрой термообработки. *Доклады БГУИР*. 2021;19(4):103–112. DOI: 10.35596/1729-7648-2021-19-4-103-112.
14. Гриценко ВА. Атомная структура аморфных нестехиометрических оксидов и нитридов кремния. *Успехи физических наук*. 2008;178(7):727–737. DOI: 10.3367/UFNr.0178.200807c.0727.
15. Xiaoge Gregory Zhang. *Electrochemistry of silicon and its oxide*. Boston: Springer Science + Business Media; 2001. XXVI, 510 p. DOI: 10.1007/b100331.
16. Родионов ЮА. *Технологические процессы в микро- и нанoeлектронике*. Москва: Инфра-Инженерия; 2019. 353 с.
17. Takahagi T, Sakaue H, Shingubara S. Adsorbed water on a silicon wafer surface exposed to atmosphere. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2001;40(11R):6198–6201. DOI: 10.1143/JJAP.40.6198.
18. Carim AH, Sinclair R. The evolution of Si/SiO₂ interface roughness. *Journal of the Electrochemical Society*. 1987;134(3):741–746.
19. Оджаев ВБ, Панфиленко АК, Петлицкий АН, Просолович ВС, Ковальчук НС, Соловьев ЯА и др. Влияние ионной имплантации азота на электрофизические свойства подзатворного диэлектрика силовых МОП-транзисторов. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2020;3:55–64. DOI: 10.33581/2520-2243-2020-3-55-64.
20. Nalwa HS, editor. *Handbook of surfaces and interfaces of materials*. San Diego: Academic Press; 2001. 5 volumes.
21. Fleetwood DM. Border traps and bias-temperature instabilities in MOS devices. *Microelectronics Reliability*. 2018;80:266–277. DOI: 10.1016/j.microrel.2017.11.007.
22. Grassier T, editor. *Noise in nanoscale semiconductor devices*. Cham: Springer Nature; 2020. VI, 729 p.

References

1. Ahopelto J, Ardila G, Baldi L, Balestra F, Belot D, Fagas G, et al. NanoElectronics Roadmap for Europe: from nanodevices and innovative materials to system integration. *Solid-State Electronics*. 2019;155:7–19. DOI: 10.1016/j.sse.2019.03.014.
2. Balestra F. Challenges for high performance and very low power operation at the end of the Roadmap. *Solid-State Electronics*. 2019;155:27–31. DOI: 10.1016/j.sse.2019.03.011.
3. Omura Y, Mallik A, Matsuo N. *MOS devices for low-voltage and low-energy applications*. Singapore: John Wiley & Sons; 2017. 496 p.
4. Deleonibus S, editor. *Electronic device architectures for the nano-CMOS era: from ultimate CMOS scaling to beyond CMOS devices*. Boca Raton: CRC Press; 2009. 426 p.
5. Borisenko VE, Hesketh PJ. *Rapid thermal processing of semiconductors*. New York: Springer Science + Business Media; 1997. XXII, 358 p. (Microdevices: physics and fabrication technologies).
6. Fair RB, editor. *Rapid thermal processing: science and technology*. Boston: Academic Press; 1993. VIII, 430 p.
7. Krasnikov GYa. *Konstruktivno-tekhnologicheskie osobennosti submikronnykh MOP-tranzistorov* [Design and technological features of submicron MOS transistors]. 2nd edition. Moscow: Tekhnosfera; 2011. 799 p. Russian.
8. Hu GQ, Lu J, Shen JY, Xu XP. Surface characterization of silicon wafers polished by three different methods. *Key Engineering Materials*. 2011;487:233–237. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.487.233.
9. Nalivaiko OYu, Saladukha VA, Pilipenko UA, Kolos VV, Belous AI, Lipinskaya TI, et al. *Bazovye tekhnologicheskie protsessy izgotovleniya poluprovodnikovyykh priborov i integral'nykh mikroskhem na kremnii. Tom 1* [Basic technological processes for the manufacture of semiconductor devices and integrated microcircuits on silicon. Volume 1]. Turtsevich AS, editor. Minck: Integralpoligraf; 2013. 703 p. Russian.
10. Doering R, Nishi Y, editors. *Handbook of semiconductor manufacturing technology*. 2nd edition. Boca Raton: CRC Press; 2008. 1720 p.
11. Reinhardt KA, Reidy RF, editors. *Handbook for cleaning for semiconductor manufacturing: fundamentals and applications*. Hoboken: John Wiley & Sons; 2011. 614 p. Co-published by the Scrivener Publishing LLC.
12. Pilipenko VA, Saladukha VA, Filipenya VA, Vorobey RI, Gusev OK, Zharin AL, et al. Characterization of the electrophysical properties of silicon – silicon dioxide interface using probe electrometry methods. *Devices and Methods of Measurements*. 2017;8(4): 344–356. Russian.
13. Kovalchuk NS, Omelchenko AA, Pilipenko VA, Solodukha VA, Shestovski DV. Formation of a gate dielectric of nanometer thickness by rapid thermal treatment. *Doklady BGUIR*. 2021;19(4):103–112. Russian. DOI: 10.35596/1729-7648-2021-19-4-103-112.
14. Gritsenko VA. Atomic structure of the amorphous nonstoichiometric silicon oxides and nitrides. *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 2008;178(7):727–737. Russian. DOI: 10.3367/UFNr.0178.200807c.0727.
15. Xiaoge Gregory Zhang. *Electrochemistry of silicon and its oxide*. Boston: Springer Science + Business Media; 2001. XXVI, 510 p. DOI: 10.1007/b100331.
16. Rodionov YuA. *Tekhnologicheskie protsessy v mikro- i nanoelektronike* [Technological processes in micro- and nanoelectronics]. Moscow: Infra-Inzheneriya; 2019. 353 p. Russian.
17. Takahagi T, Sakaue H, Shingubara S. Adsorbed water on a silicon wafer surface exposed to atmosphere. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2001;40(11R):6198–6201. DOI: 10.1143/JJAP.40.6198.
18. Carim AH, Sinclair R. The evolution of Si/SiO₂ interface roughness. *Journal of the Electrochemical Society*. 1987;134(3):741–746.
19. Odzaev VB, Panfilenko AK, Pyatlitski AN, Prasalovich US, Kovalchuk NS, Soloviev YaA, et al. Influence of nitrogen ion implantation on the electrophysical properties of the gate dielectric of power MOSFETs. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2020;3:55–64. Russian. DOI: 10.33581/2520-2243-2020-3-55-64.
20. Nalwa HS, editor. *Handbook of surfaces and interfaces of materials*. San Diego: Academic Press; 2001. 5 volumes.
21. Fleetwood DM. Border traps and bias-temperature instabilities in MOS devices. *Microelectronics Reliability*. 2018;80:266–277. DOI: 10.1016/j.microrel.2017.11.007.
22. Grasser T, editor. *Noise in nanoscale semiconductor devices*. Cham: Springer Nature; 2020. VI, 729 p.

Получена 08.12.2021 / исправлена 28.12.2021 / принята 28.12.2021.
Received 08.12.2021 / revised 28.12.2021 / accepted 28.12.2021.

Авторы:

Наталья Станиславовна Ковальчук – кандидат технических наук, доцент; заместитель главного инженера.

Юлия Александровна Марудо – инженер государственного центра «Белмикроанализ» филиала НТЦ «Белмикросистемы».

Анна Александровна Омельченко – инженер государственного центра «Белмикроанализ» филиала НТЦ «Белмикросистемы».

Владимир Александрович Пилипенко – член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор; заместитель директора по научному развитию государственного центра «Белмикроанализ» филиала НТЦ «Белмикросистемы».

Authors:

Natalya S. Kovalchuk, PhD (engineering), docent; deputy chief engineer.

Yuliya A. Marudo, engineer at the state center «Belmicroanalysis», branch STC «Belmicrosystems».

Anna A. Omelchenko, engineer at the state center «Belmicroanalysis», branch STC «Belmicrosystems».

Uladzimir A. Pilipenko, corresponding member of the National Academy of Sciences of Belarus, doctor of science (engineering), full professor; deputy director for scientific development at the state center «Belmicroanalysis», branch STC «Belmicrosystems». office@bms.by

Виталий Александрович Солодуха – доктор технических наук; генеральный директор.

Сергей Александрович Демидович – ведущий инженер отраслевой лаборатории новых технологий и материалов.

Владимир Владимирович Колос – кандидат физико-математических наук; начальник отраслевой лаборатории новых технологий и материалов.

Виктор Михайлович Анищик – доктор физико-математических наук, профессор; профессор кафедры физики твердого тела физического факультета.

Виктор Анатольевич Филипеня – ведущий инженер государственного центра «Белмикроанализ» филиала НТЦ «Белмикросистемы».

Дмитрий Викторович Шестовский – инженер-технолог отдела перспективных технологических процессов.

Vitali A. Saladukha, doctor of science (engineering); general director.

Sergey A. Demidovich, leading engineer at the industrial laboratory of new technologies and materials.

Vladimir V. Kolos, PhD (physics and mathematics); chief of the industrial laboratory of new technologies and materials.

Victor M. Anishchik, doctor of science (physics and mathematics), full professor; professor at the department of solid state physics, faculty of physics.

anishchik@bsu.by

Viktar A. Filipenia, leading engineer at the state center «Belmicroanalysis», branch STC «Belmicrosystems».

Dmitry V. Shestovski, engineer-technologist at the department of advanced technological processes.

dshestovski@integral.by

<https://orcid.org/0000-0002-4259-3276>
