



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-4-44-52>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.383:539.1.43

ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТОНКИХ ПОДЗАТВОРНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ БЫСТРОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ

Н.С. КОВАЛЬЧУК, А.А. ОМЕЛЬЧЕНКО, В.А. ПИЛИПЕНКО, В.А. СОЛОДУХА,
С.А. ДЕМИДОВИЧ, В.В. КОЛОС, В.А. ФИЛИПЕНЯ, Д.В. ШЕСТОВСКИЙ

ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 15 декабря 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. Проведены исследования электрофизических характеристик диэлектриков затвора, полученных методом быстрой термообработки двухстадийным и трехстадийным процессами. Каждая фотонная обработка (стадия) производилась в течение 12 с при постоянной мощности галогеновых ламп и нагреве пластин до максимальной температуры 1250 °С. Две первых стадии процесса проводились в атмосфере кислорода, третья – в азоте либо формовочном газе. Установлено, что для диэлектриков, полученных процессом с заключительной обработкой в атмосфере азота, абсолютная величина напряжения плоских зон на 0,42 В меньше, чем для диэлектриков, сформированных двухстадийным процессом. Это является следствием ликвидации значительной части дефектов, ответственных за наличие кулоновских центров в слое диэлектрика. Проведение фотонной обработки в атмосфере азота при высоких температурах способствует протеканию процессов перестройки структуры слоя диэлектрика. Для изоляторов, полученных трехстадийным процессом с заключительной обработкой в N₂, по сравнению с диэлектриками, сформированными двухстадийным процессом, наблюдается увеличение электрической прочности и напряжения пробоя на 1 В и 3,3 МВ/см соответственно. Рост электрической прочности указывает на релаксацию упругих напряжений деформированных связей и компенсацию оборванных связей как в диэлектрике, так и на его границе с Si в процессе высокотемпературной фотонной обработки. Положительное влияние на прочность диэлектрика также будет оказывать пассивация атомами азота дефектов на границе раздела диэлектрик/полупроводник.

Ключевые слова: метод быстрой термообработки, диэлектрик затвора, трехстадийный процесс, напряжение плоских зон, электрическая прочность, напряжение пробоя, концентрация азота.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Ковальчук Н.С., Омельченко А.А., Пилипенко В.А., Солодуха В.А., Демидович С.А., Колос В.В., Филипеня В.А., Шестовский Д.В. Исследования электрофизических свойств тонких подзатворных диэлектриков, полученных методом быстрой термообработки. Доклады БГУИР. 2022; 20(4): 44-52.

RESEARCH OF ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF THIN GATE DIELECTRICS OBTAINED BY RAPID THERMAL PROCESSING METHOD

NATALLIA S. KOVALCHUK, ANNA A. OMELCHENKO, VLADIMIR A. PILIPENKO,
VITALY A. SOLODUKHA, SERGEY V. DEMIDOVICH, VLADIMIR V. KOLOS,
VIKTOR A. FILIPENIA, DMITRY V. SHESTOVSKI

JSC "INTEGRAL" – "Integral" Holding Managing Company (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 15 December 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. Researches of the electrophysical characteristics of gate dielectrics obtained by the rapid thermal processing (RTP) method by two-stage and three-stage processes have been carried out. Each photonic processing (stage) was carried out for 12 s at a constant power of halogen lamps and heating the wafers to a maximum temperature of 1250 °C. The first two stages of the process were carried out in an oxygen atmosphere, the third - in nitrogen or a forming gas. It was found that for dielectrics obtained by the process with final processing in a nitrogen atmosphere, the absolute value of the voltage of flat zones is 0.42 V less, than for insulators, formed by a two-stage process. This is the consequence of the elimination of a significant part of the defects, responsible for the presence of Coulomb centers in the dielectric layer. Carrying out photonic processing in anitrogen atmosphere at high temperatures of procedures for proceeding of the restructuring of the structure of the dielectric layer. For insulators obtained by a three-stage process with final processing in N₂, an increase in dielectric strength and breakdown voltage by 1 V and 3.3 MV/cm, respectively, is observed in comparison with dielectrics, obtained by a two-stage process. An increase in dielectric strength indicates relaxation of elastic stresses of deformed bonds and compensation for dangling bonds both in the dielectric and at its interface with Si during high-temperature photonic treatment. Passivation by nitrogen atoms of deformations at the dielectric/semiconductor interface will also have a positive effect on the strength of the insulator.

Keywords: rapid thermal processing method, gate dielectric, three-stage process, flat zone voltage, dielectric strength, breakdown voltage, nitrogen concentration.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Kovalchuk N.S., Omelchenko A.A., Pilipenko V.A., Solodukha V.A., Demidovich S.V., Kolos V.V., Filipenia V.A., Shestovski D.V. Research of Electrophysical Properties of Thin Gate Dielectrics Obtained by Rapid Thermal Processing Method. Doklady BGUIR. 2022; 20(4): 44-52.

Введение

В результате активного совершенствования элементной базы цифровой электроники все более высокие требования предъявляются к эксплуатационным параметрам и надежности кремниевых интегральных схем (ИС), основой логических элементов которых являются МОП-транзисторы. Наличие дефектов структуры как в оксиде кремния, так и на его границе раздела с Si приводит к образованию зарядовых центров и снижению электрической прочности слоя изолятора затвора МОП-транзисторов, что негативно сказывается на их функциональных параметрах [1].

Согласно [2], электрофизические свойства (надежность, наличие зарядовых центров в слое изолятора и на его границе раздела с полупроводником) оксидов, сформированных процессом быстрой термообработки (БТО), превалируют над термическими SiO₂, полученными в термодиффузионных печах. Однако стандартная длительность процесса формирования оксида кремния методом БТО составляет 60–170 с, при этом производится получение оксида только одной пластины, что затрудняет применение такого процесса крупносерийным производством [3].

Азотирование SiO₂ затвора методами нитрования (в среде NH₃, NO, NO₂), ионной имплантации либо плазмостимулированными процессами позволяет получать МОП-транзисторы

и ИС на их основе с улучшенными эксплуатационными свойствами [4]. Представляет интерес азотирование оксида кремния в атмосфере N_2 ввиду более низкой стоимости и широкого практического применения азота в производстве ИС.

На основании вышеизложенного актуальным является проведение исследований электрофизических параметров диэлектриков затвора, полученных методом БТО, фотонной обработкой секундной длительности для МДП-структур интегральных схем.

Методика проведения эксперимента

Получение диэлектриков затвора производилось на пластинах кремния ориентацией $\langle 100 \rangle$ с удельным сопротивлением $\rho = 4,5$ Ом·см, легированных примесью фосфора. На поверхности пластин предварительно формировался термический SiO_2 толщиной 100 нм, затем оксид кремния полностью стравливался, после производилась химическая очистка пластин по технологии Radio Corporation of America (RCA) согласно методике, приведенной в [5].

Получение тонких диэлектриков затвора производилось системой As-Master в стационарной атмосфере кислорода, азота либо формовочного газа ($N_2 - 97\%$, $H_2 - 3\%$) при атмосферном давлении. Пластины облучались с непланарной стороны потоками фотонов 20 галогенных ламп импульсами постоянной мощности длительностью 12 с в режиме теплового баланса. Мощность излучения ламп подбиралась предварительно, по достижению температуры фотонной обработки 1250 °С в течение 12 с при проведении тестовых процессов на аналогичных пластинах.

Температура в процессе БТО контролировалась пирометром, расположенным над центром планарной стороны пластины. Образцы охлаждались до комнатной температуры после каждой стадии фотонной обработки, последующая стадия проводилась без извлечения пластины из реактора системы As-Master. Для всех процессов две первые стадии производились в атмосфере кислорода, а заключительная фотонная обработка (при ее наличии) – в атмосфере азота либо формовочного газа.

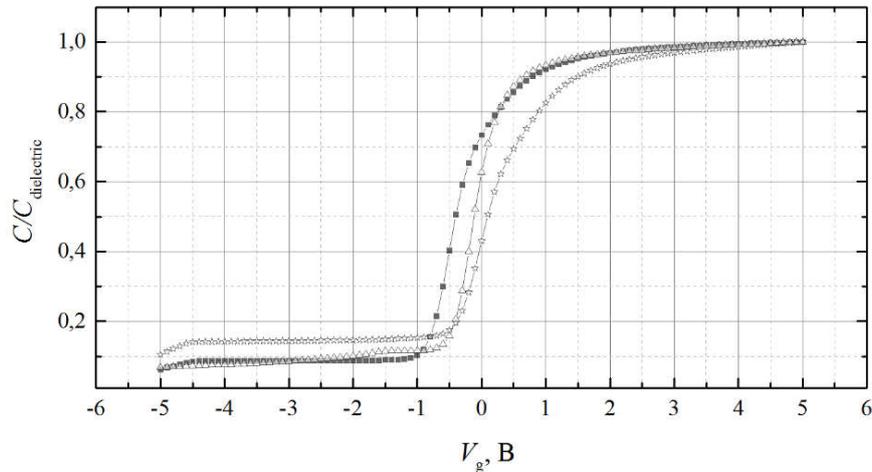
Вольт-амперные характеристики (ВАХ) и вольт-фарадные характеристики (ВФХ) получены автоматизированным измерительным комплексом HP4061A на МДП-структуре, образованной омическим контактом металлического зонда к диэлектрику на пластине кремния. ВАХ изолятора затвора измерялись с применением золотого зонда в режиме ограничения по току $I_{max} = 10$ нА, с темпом возрастания напряжения 3,4 мс/В. ВФХ регистрировались с применением индиевого зонда на частоте 1 МГц в диапазоне напряжений от -5 до 5 В с шагом 0,1 В. Значения емкости МДП-конденсатора и напряжения плоских зон извлекались из ВФХ программно, с применением средства аппаратного проектирования IC CAP 2016.01 Keysight.

Результаты и их обсуждение

Ранее было показано [6], что для диэлектриков, полученных методом БТО двумя стадиями в атмосфере кислорода и третьей в азоте, показатель преломления, измеренный на длине волны $\lambda = 632,8$ нм, составил 1,51. Для слоев изоляторов, изготовленных аналогичными режимами с последней обработкой в формовочном газе, величина показателя преломления, полученная при такой же длине волны, составила 1,48. Согласно правилу Мотта, с учетом валентностей кремния, кислорода и азота соотношение атомов в слое диэлектрика, полученном процессом БТО с заключительной обработкой в атмосфере N_2 , составило $SiO_{1,47}N_{0,35}$, что соответствует 8 % массовой доли азота в полученном слое. Для пленок $Si_xO_yN_z$ с заключительной стадией фотонной обработки в формовочном газе значения индексов составили $SiO_{1,72}N_{0,18}$, здесь массовая доля азота соответствует 4 %. Рост величины показателя преломления полученных изоляторов указывает на протекание процессов прямого азотирования оксида кремния в ходе высокотемпературной фотонной обработки в течение 12 с при максимальной температуре 1250 °С.

На рис. 1 приведены высокочастотные ВФХ МДП-структур с диэлектриками, полученными методом БТО. При сравнении характеристик в области обеднения и частично в области слабой инверсии для оксидов кремния со средним значением толщины слоев $\langle d \rangle = 10,5$ нм, сформированных двухстадийным процессом, относительно диэлектриков $\langle d \rangle = 9,0$ нм, полученных трехстадийным процессом с последней стадией обработки

в атмосфере N_2 , наблюдается сдвиг кривой вдоль оси напряжений в направлении более низких V_g .



Режимы получения диэлектриков: \blacksquare – двухстадийным процессом в атмосфере O_2 ; $-\Delta$ – трехстадийным процессом (две стадии в атмосфере O_2 и третья в формовочном газе); $-\star$ – трехстадийн процессом (две стадии в атмосфере O_2 и третья в N_2)

Dielectric production modes: \blacksquare – a two-stage process in an O_2 atmosphere; $-\Delta$ – a three-stage process (two stages in an O_2 atmosphere and a third in a forming gas), $-\star$ – a three-stage process (two stages in an O_2 atmosphere and a third in N_2)

Рис. 1. Вольт-фарадные характеристики МДП-структур с различными диэлектриками затвора, полученными методом БТО при максимальной температуре $1250^\circ C$ световыми потоком длительностью 12 с
Fig. 1. Capacitance-voltage characteristics of MIS structures with various gate dielectrics obtained by the RTP method at a maximum temperature of $1250^\circ C$ with a light flux of 12 s duration

Для изоляторов $\langle d \rangle = 9,7$ нм, полученных процессом с заключительной стадией БТО в формовочном газе, относительно образцов с обработкой в азоте также наблюдается смещение характеристик влево. Действительно, для МДП-структур на кремнии n -типа наблюдаются соответствующие изменения величины напряжения плоских зон (V_{fb}), значения которых составили: $-0,59$ В для двухстадийного процесса, $-0,28$ В и $-0,17$ В для трехстадийного процесса с заключительной обработкой в формовочном газе и азоте соответственно.

Согласно [7], для случая реальной МДП-структуры величина V_{fb} в основном будет определяться разницей работ выхода и наличием заряда в диэлектрике:

$$V_{fb} = \Delta\phi_{Me/n-Si} - Q_{dielectric} / C_{dielectric}, \quad (1)$$

где $\Delta\phi_{Me/n-Si}$ – разность химических потенциалов работы выхода электрона из металла и полупроводника n -типа, $Q_{dielectric}$ – полный заряд в диэлектрике, $C_{dielectric}$ – емкость слоя изолятора конденсатора. Возможным процессом снижения величины полного заряда в диэлектрике является ликвидация дефектов, ответственных за наличие зарядовых центров.

Согласно [8], наибольшая часть дефектов в оксиде кремния находится в положительно заряженном либо электронейтральном состоянии. Так, при проведении третьей стадии БТО возможно будут происходить процессы перестройки структуры и уплотнения диэлектрика, из-за чего активизируются процессы релаксации напряженных и перекомпенсации оборванных связей в изоляторе. В результате происходит ликвидация положительно заряженных кулоновских центров, что и будет оказывать влияние на рост величины V_{fb} .

На рис. 1 в области обеднения ВФХ наблюдаются различия наклонов характеристик для образцов, полученных с применением двух- и трехстадийных процессов БТО. Анализируя высокочастотные зависимости измеренных значений емкости, можно отметить рост наклона кривой для структур с диэлектриком, полученным процессом с обработкой в формовочном газе, что свидетельствует об уменьшении плотности поверхностных состояний. Известно, что граница раздела Si/SiO_2 представляет собой тонкий переходный слой нестехиометрического

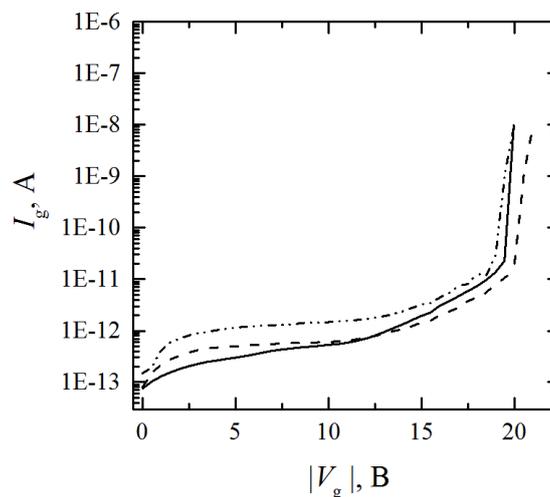
состава, при этом из-за несоответствия кристаллических решеток кремния и SiO_2 на их границе раздела образуются напряженные либо некомпенсированные связи.

При проведении третьей стадии фотонной обработки в формовочном газе непосредственное участие в процессах образования химических связей с атомами некомпенсированных связей дефектов кристаллической решетки на границе раздела диэлектрик/полупроводник будет принимать водород из атмосферы реактора системы. В связи с этим происходит пассивация электрически активных центров поверхностных состояний.

Установлено [9], что после термического отжига пластин кремния ориентацией $\langle 100 \rangle$ со слоем SiO_2 в атмосфере с добавлением H_2 при 900°C происходит пассивация дефектов класса P_b и других неклассифицированных дефектов в оксиде кремния и на его границе с Si. Также в [9] показано, что при температурах, больших 250°C , эффективна пассивация электрически активных P_b -центров молекулярным водородом. Согласно [10, 11], возможно образование гидроксильного E' -центра и мостикового водорода Si-H-Si как в оксиде кремния, так и на его границе с Si.

Дополнительным механизмом, оказывающим влияние, является встраивание атомов азота в систему Si/SiO₂. При наличии атомов азота на границе раздела будет происходить их встраивание в дефекты кристаллической решетки: атомы азота находят себе ниши в соответствии со своим ковалентным радиусом, что приводит к пассивации части электрически активных поверхностных состояний (P_{b0} -центров) [12]. Наличие атомов азота на границе раздела Si/SiO₂ вполне вероятно ввиду малой толщины оксида, подвергнутого высокотемпературной фотонной обработке.

На рис. 2 представлены ВАХ МДП-структур с диэлектриками, полученными методом БТО различными режимами. В процессе получения ВАХ при приложении сильного смещения через диэлектрик будет протекать преимущественно туннельный ток Фаулера – Нордгейма, также происходит инжекция носителей заряда в слой изолятора (рис. 1, $V_g = 14\text{--}17\text{ В}$, участки с квадратичной зависимостью). Непосредственно в диэлектрике и на его границе раздела с Si будет происходить разрыв ковалентных связей с образованием дефектов и, как следствие, появление ловушек носителей зарядов. По достижению ими достаточной концентрации сформируется проводящий канал между металлическим контактом и полупроводником, что приведет к последующему пробою барьерного слоя. В связи с этим наличие ловушек либо непрочных связей в исходном слое изолятора будет негативно сказываться на его электрической прочности.



Режимы получения диэлектриков: — — две стадии в атмосфере O_2 ; - - - - две стадии в атмосфере O_2 и третья стадия в N_2 ; - · - · - две стадии в атмосфере O_2 и третья стадия в формовочном газе
Dielectric production modes: — — two stages in an O_2 atmosphere; - - - - a three-stage process (two stages in an O_2 atmosphere and a third in N_2); - · - · - a three-stage process (two stages in an O_2 atmosphere and a third in a forming gas)

Рис. 2. Вольт-амперные характеристики МДП-структур с диэлектриками, полученными методом БТО фотонными обработками длительностью 12 с при их максимальной температуре 1250°C

Fig. 2. Current-voltage characteristics of MIS structures with dielectrics obtained by the RTP method by photonic treatments for 12 s at their maximum temperature of 1250°C

Для оксидов затвора, сформированных двухстадийным процессом, абсолютная величина напряжения пробоя составила 20 В, что на 1 В меньше по сравнению с изоляторами, подвергнутыми фотонной обработке в N₂. Электрическая прочность (E_{break}) составила 19 МВ/см и 23,3 МВ/см для двухстадийного и трехстадийного процессов с обработкой в атмосфере N₂ соответственно. Рост напряжения пробоя и электрической прочности является следствием протекания предполагаемых процессов, происходящих при проведении третьей стадии БТО в азоте: релаксация упругих напряжений деформированных связей, а также компенсации оборванных связей как в диэлектрике, так и на его границе раздела с кремнием. Азотирование SiO₂ будет положительно сказываться на величине E_{break} изолятора, так как Si_xO_yN_z является более электрически прочным, чем SiO₂. Присутствие атомов азота на границе раздела Si/SiO₂ приводит к замене напряженных либо некомпенсированных связей на более прочные с атомами азота, что является следствием роста электрической прочности для образцов, полученных трехстадийным процессом с обработкой в азоте по сравнению с двухстадийным процессом [12].

При сравнении диэлектриков, сформированных трехстадийным методом БТО, видно, что для изоляторов с азотированием в N₂ напряжение пробоя и электрическая прочность больше на 1 В и 2,7 МВ/см соответственно. Наряду с процессами, протекающими при проведении третьей стадии процесса БТО, при высокотемпературной фотонной обработке оксида кремния в формовочном газе дополнительно протекают процессы частичного разупорядочивания структуры диэлектрика и его границы раздела с Si, что и является следствием снижения напряжения пробоя и электрической прочности. Включение атомов водорода в структуру сопровождается разрывом связей Si-O с участием мостикового кислорода, в результате чего происходит образование одновалентных -ОН групп с низкой энергией диссоциации. Похожие результаты наблюдались в работе [13]: под воздействием молекулярного водорода происходило образование Si-OH и Si-H групп в SiO₂ для мостиковых и немостиковых атомов кислорода, а также и для некомпенсированных Si- связей. Приведенные рассуждения о разупорядочивании косвенно подтверждаются более низким значением показателя преломления для диэлектриков, полученных методом БТО трехстадийным процессом с заключительной обработкой в формовочном газе по сравнению с диэлектриками, полученными с обработкой в азоте [6].

Для большинства структур при изготовлении микросхем на основе кремния в качестве затвора МДП-транзисторов применяется поликремний. Под воздействием горячих электронов при смещении Фаулера – Нордгейма будет происходить высвобождение водорода с последующим образованием некомпенсированной связи атома Si (дефект класса P_b). Такой процесс может происходить на границах раздела: Si (активная область)/SiO₂ и поликремний-SiO₂, что будет сопровождаться образованием дефектов на этих поверхностях. Стоит отметить, что высвобождение водорода на границе раздела поликремний-SiO₂ и его диффузия через тонкий слой оксида могут оказывать влияние на концентрацию некомпенсированных дефектов класса P_b на границе раздела Si/SiO₂ [14]:



В работе [15] установлено, что под действием горячих электронов будет происходить диссоциация Si-H и SiO-H комплексов с образованием некомпенсированных связей Si- и SiO-. Также авторами [15] показано, что изначально будут распадаться именно водородосодержащие комплексы, затем под воздействием более высокоэнергетических носителей будет происходить разрыв связей ≡Si-O-Si≡ и ≡Si-Si≡. Горячие электроны, инжектированные в диэлектрик, могут высвобождать атомы водорода, в результате чего будет происходить образование как некомпенсированных связей в оксиде кремния (в том числе и E'-центров), так и поверхностных состояний, в большинстве своем это пассивированные ранее атомами водорода P_b-центры, которые расположены в переходных слоях оксида кремния и на границе раздела Si/SiO₂.

Заключение

В ходе проведения исследований вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик диэлектриков затвора, полученных методом БТО фотонными обработками пластин длительностью 12 с при максимальной температуре 1250 °С двухстадийным процессом

в атмосфере кислорода и трехстадийным процессом (две первых стадии в O_2 , третья в N_2 либо формовочном газе) для МДП-транзисторов интегральных схем сделаны следующие выводы:

Установлено, что абсолютная величина напряжения плоских зон на 0,42 В больше для диэлектриков, полученных двухстадийным процессом, по сравнению с диэлектриками, полученными трехстадийным процессом с заключительной обработкой в атмосфере азота, что является следствием снижения концентрации заряженных центров в диэлектрике. Проведение третьей стадии фотонной обработки при высоких температурах способствует процессам перестройки структуры, при этом происходит компенсация оборванных связей в слое диэлектрика.

Показано, что величины напряжения пробоя и диэлектрической прочности для диэлектриков, полученных трехстадийным процессом с заключительной обработкой в азоте, больше на 1 В и 3,3 МВ/см соответственно, чем для оксидов, изготовленных двухстадийным процессом. Результаты указывают на релаксацию упругих напряжений деформированных связей и компенсацию оборванных связей как в диэлектрике, так и на его границе с Si в процессе третьей стадии высокотемпературной фотонной обработки. Положительное влияние на прочность изолятора также будет оказывать пассивация атомами азота дефектов на границе раздела диэлектрик/полупроводник.

Для диэлектриков с заключительной обработкой в формовочном газе напряжение пробоя и электрическая прочность меньше на 1 В и 2,7 МВ/см соответственно, чем для диэлектриков, полученных трехстадийным процессом с обработкой в атмосфере азота. При фотонной обработке в формовочном газе дополнительно будут происходить процессы разупорядочивания структуры вследствие образования гидроксильных групп в системе диэлектрик – полупроводник, сопровождаемых разрывом связей Si-O с участием мостикового кислорода и образованием одновалентных -ОН групп.

Список литературы

1. Deleonibus S. *Electronic Devices Architectures for the NANO-CMOS Era*. Boca Rotation: CRC Press; 2019.
2. Fair R.B. *Rapid thermal processing: science and technology*. Boston: Academic Press; 1993.
3. Borisenko V.E. Hesketh P.J. *Rapid Thermal Processing of Semiconductors*. New York: Springer Science+Business Media; 1997.
4. Красников Г.Я. *Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов*. Москва: Техносфера; 2011.
5. Nishi Y., Doering R. *Handbook of semiconductor manufacturing technology*. Boca Raton: CRC press; 2008.
6. Ковальчук Н.С., Омельченко А.А., Пилипенко В.А. 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.
7. Sze S.M., Lee M.K. *Semiconductor Devices: Physics and Technology*. New York: John Wiley & Sons Singapore Pte. Limited; 2012.
8. Белоус А.И., Солодуха В.А., Шведов С.В. *Космическая электроника*. Книга 1. Москва: Техносфера; 2015.
9. Nalwa H.S. *Handbook of surfaces and interfaces of materials, five-volume set*. San Diego: Elsevier; 2001.
10. Fleetwood D.M. Border traps and bias-temperature instabilities in MOS devices. *Microelectronics Reliability*. 2018;80:266-277. DOI: 10.1016/j.microrel.2017.11.007.
11. Grasser T. *Noise in Nanoscale Semiconductor Devices*. Cham: Springer Nature; 2020.
12. Оджаев В.Б., Панфиленко А.К., Петлицкий А.Н. 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.
13. Vitiello M., Lopez N., Illas F., Pacchioni G. H_2 Cracking at SiO_2 Defect Centers. *The Journal of Physical Chemistry A*. 2000;104(20):4674-4684. DOI: 10.1021/jp993214f.
14. Cartier E., Buchanan D.A., Dunn G.J. Atomic hydrogen-induced interface degradation of reoxidized-nitrided silicon dioxide on silicon. *Applied physics letters*. 1994;64(7):901-903. DOI: 10.1063/1.110990.
15. Cezhou Z., Desheng Z., Baohua S. Hot carrier effect — model, mechanism and effects on CV and IV characteristics in MOS structures. *Microelectronics Reliability*. 1996;36(4):493-496. DOI: 10.1016/0026-2714(96)00172-2.

References

1. Deleonibus S. *Electronic Devices Architectures for the NANO-CMOS Era*. Boca Raton: CRC Press; 2019.
2. Fair R.B. *Rapid thermal processing: science and technology*. Boston: Academic Press; 1993.
3. Borisenko V.E., Hesketh P.J. *Rapid Thermal Processing of Semiconductors*. New York: Springer Science+Business Media; 1997.
4. Krasnikov G.Ya. [*Design and technological features of submicron MOS transistors*]. Moscow: Technosphere; 2011. (in Russ.)
5. Nishi Y., Doering R. *Handbook of semiconductor manufacturing technology*. Boca Raton: CRC press; 2008.
6. Kovalchuk N.S., Omelchenko A.A., Pilipenko V.A. [Formation of a gate dielectric of nanometer thickness by rapid thermal process]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2021;4:103-112. DOI: 10.35596/1729-7648-2021-19-4-103-112. (in Russ.)
7. Sze S.M., Lee M.K. *Semiconductor Devices: Physics and Technology*. New York: John Wiley & Sons Singapore Pte. Limited; 2012.
8. Belous A.I., Solodukha V.A., Shvedov S.V. [*Space electronics*]. Book 1. Moscow: Technosphere; 2015. (in Russ.)
9. Nalwa H.S. *Handbook of surfaces and interfaces of materials, five-volume set*. San Diego: Elsevier; 2001.
10. Fleetwood D.M. Border traps and bias-temperature instabilities in MOS devices. *Microelectronics Reliability*. 2018;80:266-277. DOI: 10.1016/j.microrel.2017.11.007.
11. Grasser T. *Noise in Nanoscale Semiconductor Devices*. Cham: Springer Nature; 2020.
12. Odzaev V.B., Panfilenko A.K., Pyatlitski A.N. [Influence of ion implantation of nitrogen on the electrophysical properties of the gate dielectric of power MOS transistors]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Fizika = Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2020;3:55-64. DOI: 10.33581/2520-2243-2020-3-55-64. (in Russ.)
13. Vitiello M., Lopez N., Illas F., Pacchioni G. H₂ Cracking at SiO₂ Defect Centers. *The Journal of Physical Chemistry A*. 2000;104(20):4674-4684. DOI: 10.1021/jp993214f.
14. Cartier E., Buchanan D.A., Dunn G.J. Atomic hydrogen-induced interface degradation of reoxidized-nitrided silicon dioxide on silicon. *Applied physics letters*. 1994;64(7):901-903. DOI: 10.1063/1.110990.
15. Cezhou Z., Desheng Z., Baohua S. Hot carrier effect – model, mechanism and effects on CV and IV characteristics in MOS structures. *Microelectronics Reliability*. 1996;36(4):493-496. DOI: 10.1016/0026-2714(96)00172-2.

Вклад авторов

Ковальчук Н.С., Пилипенко В.А., Солодуха В.А., Колос В.В. осуществили постановку задачи для проведения исследования, участвовали в обсуждении результатов.

Демидович С.А. провел изготовление образцов, участвовал в обсуждении результатов.

Омельченко А.А., Филипеня В.А. провели измерения, участвовали в обсуждении результатов.

Шестовский Д.В. провел изготовление образцов, подготовил аналитический обзор по тематике, провел анализ и систематизацию полученных результатов, подготовил рукопись статьи.

Authors' contribution

Kovalchuk N.S., Pilipenko V.A., Solodukha V.A., Kolos V.V. carried out the formulation of the research problem, participated in the discussion of the results.

Demidovich S.V. carried out the obtaining of samples, participated in the discussion of the results.

Omelchenko A.A., Filipenia V.A. measured the samples, participated in the discussion of the results.

Shestovski D.V. completed the obtaining of samples, produced an analytical review on the subject, analyzed and systematized the results, prepared the manuscript of the article.

Сведения об авторах

Ковальчук Н.С., к.т.н., доцент, первый заместитель главного инженера ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Омельченко А.А., инженер ГЦ «Белмикрoанализ» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Пилипенко В.А., д.т.н., профессор, член-корр. НАН Беларуси, зам. директора по научному развитию Государственного центра «Белмикрoанализ» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Солодуха В.А., д.т.н., ген. директор ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Демидович С.А., ведущий инженер отраслевой лаборатории новых технологий и материалов ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Колос В.В., к.ф.-м.н., начальник отраслевой лаборатории новых технологий и материалов ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Филипеня В.А., ведущий инженер ГЦ «Белмикрoанализ» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Шестовский Д.В., инженер-технолог отдела перспективных технологических процессов ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Адрес для корреспонденции

220108, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Казинца, 121 а,
ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга ОАО «ИНТЕГРАЛ»;
тел. +375-17-318-37-41;
e-mail: office@bms.by
Пилипенко Владимир Александрович

Information about the authors

Kovalchuk N.S., Cand. of Sci., Assistant Professor, First Deputy Chief Engineer of the JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company.

Omelchenko A.A., Engineer of the «Belmicroanalysis» State Center of the JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company.

Pilipenko V.A., Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Corr. Member of the NAS of Belarus, Deputy Director for Scientific Development of the «Belmicroanalysis» State Center of the JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company.

Solodukha V.A., Dr. of Sci. (Tech.), General Director of the JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company.

Demidovich S.A., Leading Engineer at the New Technologies and Materials Industrial Laboratory of the JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company.

Kolos V.V., Cand. of Sci., Acting Chief of the New Technologies And Materials Industrial Laboratory of the JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company.

Filipenia V.A., Leading Engineer at the «Belmicroanalysis» State Center of the JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company.

Shestovski D.V., Engineer-Technologist at the Advanced Technological Processes Department of the JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company.

Address for correspondence

220108, Republic of Belarus,
Minsk, Kazintsa St., 121 a,
JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company;
tel. +375-17-318-37-41;
e-mail: office@bms.by
Pilipenko Vladimir Aleksandrovich