



<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 $\rho = 4,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, 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°C 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 $I_{\text{max}} = 10 \text{ нА}$, с темпом возрастания напряжения $3,4 \text{ мВ/В}$. ВФХ регистрировались с применением индиевого зонда на частоте 1 МГц в диапазоне напряжений от -5 до 5 В с шагом $0,1 \text{ В}$. 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 $\lambda = 632,8 \text{ нм}$, 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°C .

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 $\langle d \rangle = 10,5 \text{ нм}$, сформированных двухстадийным процессом, относительно диэлектриков $\langle d \rangle = 9,0 \text{ нм}$, полученных трехстадийным процессом с последней стадией обработки