



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-4-103-112>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.383:539.1.43

ФОРМИРОВАНИЕ ПОДЗАТВОРНОГО ДИЭЛЕКТРИКА НАНОМЕТРОВОЙ ТОЛЩИНЫ МЕТОДОМ БЫСТРОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ

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

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

Поступила в редакцию 20 апреля 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Проведены исследования толщины и оптических характеристик тонких пленок SiO₂, полученных одно-, двух- или трехстадийным процессом быстрой термической обработки (БТО) при атмосферном давлении, импульсами длительностью 6, 12 и 20 с. Для получения тонких пленок SiO₂ методом БТО в качестве исходных образцов использовали пластины кремния КЭФ4,5 (100). Предварительно образцы окислялись при 1000 °С во влажном кислороде (толщина полученного SiO₂ $d = 100$ нм), затем в растворе плавиковой кислоты проводилось полное снятие оксида кремния, после пластины подвергались химической очистке по технологии Radio Corporation of America (RCA). Окисление в стационарной атмосфере кислорода производилось в одну или две стадии при нагреве пластин импульсом света разной мощности до максимальных температур 1035 – 1250 °С, а также трехстадийным процессом, где заключительным этапом был отжиг в атмосфере азота либо в формовочном газе (N₂ 97 % + H₂ 3 %). Были проведены исследования характеристик азотированных в N₂ барьерных структур SiO₂-Si, полученных процессом БТО световыми потоками импульсами секундной длительности для улучшения электрофизических параметров оксидов затвора методом БТО, что представляет интерес для интегральных микросхем (ИС) с большой плотностью расположения активных областей приборов.

Ключевые слова: окисление кремния, толщина оксида кремния, фотодиссоциация, равномерность оксида кремния, прямое азотирование, показатель преломления, концентрация азота.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Ковальчук Н.С., Омельченко А.А., Пилипенко В.А., Солодуха В.А., Шестовский Д.В. Формирование подзатворного диэлектрика нанометровой толщины методом быстрой термообработки. Доклады БГУИР. 2021; 19(4): 103-112.

FORMATION OF A GATE DIELECTRIC OF NANOMETER THICKNESS BY RAPID THERMAL TREATMENT

NATALLIA S. KOVALCHUK, ANNA A. OMELCHENKO, VLADIMIR A. PILIPENKO,
VITALY A. SOLODUKHA, DMITRY V. SHESTOVSKI

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

Submitted 20 April 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. Investigations of the thickness and optical characteristics of thin SiO₂ films obtained by one-, two-, or three-stage rapid thermal processing (RTP) at atmospheric pressure, pulses of 6, 12, and 20 s duration have been carried out. To obtain thin SiO₂ films by the RTP method, N-type:Ph 4.5 Ohm/□ (100) silicon wafers were used as initial samples. The samples were preliminarily oxidized at 1000 °C of the obtained wet oxygen (SiO₂ $d = 100$ nm), then the silicon oxide was completely removed in a solution of hydrofluoric acid, after which the wafers were subjected to chemical cleaning using the Radio Corporation of America (RCA) technology. Oxidation in a stationary oxygen atmosphere was carried out in one or two stages by heating the plates with a light pulse of different power up to maximum temperatures of 1035 – 1250 °C, as well as a three-stage process, where the final stage was annealing in a nitrogen atmosphere or in a forming gas (N₂ 97% + H₂ 3%). The characteristics of SiO₂-Si barrier structures nitrided in N₂, obtained by the RTP process by light fluxes with pulses of a second duration, were studied to improve the electrophysical parameters of gate oxides by the RTP method. It is of interest for integrated circuits (ICS) with a high density of the active regions of devices.

Keywords: silicon oxidation, silicon oxide thickness, photodissociation, silicon oxide uniformity, direct nitriding, refractive index, 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., Shestovski D.V. Formation of a gate dielectric of nanometer thickness by rapid thermal treatment. Doklady BGUIR. 19(4): 103-112.

Введение

В связи с ростом степени интеграции все более и более высокие требования предъявляются к параметрам управляющих МОП транзисторов [1], которые напрямую зависят от электрофизических свойств оксида затвора [2]. Электрическая прочность диэлектрика, его сопротивление, а также воздействие зарядовых кулоновских центров в системе Si-SiO₂ на эксплуатационные параметры МОП-транзисторов является определяющим при увеличении степени интеграции [2, 3]. Одним из способов улучшения электрофизических параметров оксида затвора и его границ является азотирование SiO₂ [3]. Азотирование методом БТО в атмосфере N₂ является менее затратным ввиду невысокой стоимости N₂ высокой чистоты по сравнению с N₂O, NO, NH₃, в связи с чем равновесное прямое азотирование в атмосфере N₂ является более привлекательным для применения в техпроцессах.

Получение оксидов затвора методом БТО представляет интерес для интегральных микросхем (ИС) с большой плотностью расположения активных областей приборов в силу малого термобюджета такого процесса [4]. В работе [5] путем окисления Si методом БТО, по сравнению с параметрами оксида кремния, полученного в термодиффузионных печах, были получены диэлектрики с улучшенными характеристиками, такими как: заряд пробоя диэлектрика, плотность фиксированного заряда в оксиде кремния и плотность поверхностных состояний.

Типовым является двух- либо трехступенчатый процесс быстрого окисления кремния, на первой стадии которого в течении 30 – 50 с с предварительным нагревом камеры до 600 – 780 °C с целью получения более точной температуры, избегания ее флуктуаций

при проведении последующих этапов формирования оксида [4, 5]. В целом такой процесс окисления занимает 60–170 с. Следует отметить, что получение тонких пленок SiO₂ с требуемыми электрофизическими параметрами при проведении групповых операций в термодиффузионных печах [6] является менее затратным, более быстрым и эргономичным процессом. В связи с этим на сегодняшний день является актуальной задача оптимизации технологического процесса формирования оксида кремния с использованием БТО путем сокращения времени обработки.

Методика проведения эксперимента

Формирование тонких оксидов БТО проводилось системой As-Master в стационарной атмосфере кислорода при атмосферном давлении. Облучение пластин производилось 20 галогеновыми лампами с непланарной стороны световыми потоками длительностью 6, 12 и 20 с в режиме теплового баланса. Оксид формировался на пластинах кремния, легированных фосфором с $\rho = 4,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ориентацией (100). Предварительно пластины кремния окислялись при 1000 °С во влажном кислороде (толщина полученного SiO₂ $d = 100 \text{ нм}$), затем в растворе плавиковой кислоты проводилось полное снятие оксида кремния, после пластины подвергались химической очистке по технологии RCA согласно методике приведенной в [6]. Для двух- и трехэтапного процесса БТО после каждой стадии пластины охлаждались до комнатной температуры, последующие этапы отжига проходили без извлечения пластины из реактора. Контроль температуры производился по пирометру, расположенному над центром планарной стороны пластины. Показатель преломления и толщина полученного SiO₂ измерялись на длине волны $\lambda = 632,8 \text{ нм}$ с использованием спектрального эллипсометра UVISEL 2 (ф. Horiba, Франция).

На рис.1 приведена зависимость толщины оксида от максимальной температуры БТО световыми потоками длительностью 6 с, 12 с и 20 с.

Общая тенденция увеличения толщины формируемого оксида кремния с возрастанием мощности светового потока прослеживается как при получении ультратонких слоев диэлектрика (3,2 нм – 5 нм), так и с возрастанием толщины получаемого оксида до 8 нм. Как видно из рис. 1, толщина пленки SiO₂, сформированной фотонной обработкой длительностью 6 с при нагреве до 1150 °С, в 1,2 раза больше толщины пленки SiO₂, полученной за 20 с для одностадийного процесса с той же максимальной температурой.

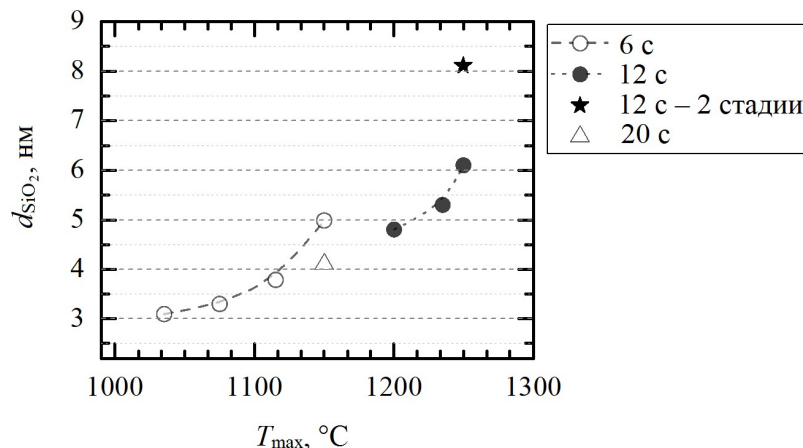


Рис. 1. Зависимость толщины оксида, полученного методом БТО световыми потоком длительностью 6, 12, 20 с от максимальной температуры одностадийной или двухстадийной обработки
Fig. 1. Dependence of the oxide thickness obtained by the RTP method with a light flux duration of 6, 12, 20 s on the maximum temperature of one-stage or two-stage processing

Анализ результатов, приведенных на рис.1, показал, что толщина SiO₂, полученного при проведении двух последовательных процессов БТО световым потоком длительностью 12 с, $T_{\text{max}} = 1250 \text{ °C}$ несколько меньше, чем удвоенная толщина оксида кремния, полученного при одностадийном процессе окисления. Это указывает на снижение скорости повторного окисления кремния с тонким слоем SiO₂ при высоких температурах. Очевидно это связано

с уплотнением кремниевых слоев в приповерхностной области пластины под оксидным слоем, возникшим после первой стадии процесса. Основным механизмом уплотнения Si является уменьшение толщины нарушенного слоя, образовавшегося в процессе полировки пластин, вследствие движения границы раздела Si-SiO₂ вглубь Si по нормали к поверхности пластины. На структуру приповерхностных слоев Si также оказывают влияние процессы инжекции из подложки и генерации собственных междоузельных атомов на границе Si-SiO₂ в процессе окисления. По мере роста толщины пленки коэффициент диффузии кислорода в приповерхностных уплотненных слоях уменьшается, и скорость процесса окисления Si также снижается. Такое изменение скорости существенно только на начальных этапах процесса окисления. Наблюдаемая нами значительная разница толщины оксидов кремния обусловлена спецификой формирования более толстых слоев SiO₂, где может наблюдаться не линейная, а параболическая скорость роста оксида. Это в целом соответствует результатам многочисленных исследований процессов получения тонких пленок SiO₂ методом БТО [4, 7, 8]. Хотя скорость роста в процессе БТО варьируется между исследователями, но большинство из них сообщает о точке разрыва между начальным быстрым ростом и более медленным продолжающимся ростом с увеличением толщины оксидной пленки. Процесс окисления методом БТО может быть определен двумя линейными режимами и параболической областью: начальный быстрый рост, за которым следует более медленный рост и, наконец, переход к параболическому росту для более толстых пленок.

Известно, что при температурах 1035 – 1250 °С молекулы кислорода являются стабильными, под действием высоких температур при 2300 °С лишь около 1 % молекул кислорода диссоциирует, в связи с этим возможным механизмом распада молекул при БТО являются фотодиссоциация под действием потока фотонов. Энергия диссоциации молекулы кислорода 5 эВ, что соответствует $\lambda = 0,25$ мкм. В нашем случае спектр излучения галогенной лампы системы БТО находится в диапазоне длин волн 0,5 – 2 мкм, максимум спектра $\lambda_{\text{maxBTO}} \sim 1$ мкм. Одним из возможных механизмов увеличения скорости роста оксида кремния на начальных этапах процесса окисления будет двухфотонная фотодиссоциация под воздействием мощного светового потока. При этом маловероятным будет процесс ионизации атомов кислорода вследствие поглощения сразу нескольких фотонов, так как минимальная длина волны при однофотонной ионизации атома кислорода 94 нм (13,6 эВ).

Диссоциация молекулы кислорода будет вносить вклад в увеличение скорости роста оксида кремния для недлительных процессов ввиду распада молекул практически сразу после включения ламп, что подтверждается данными, полученными в работе [7], где наблюдался рост средней скорости окисления для процессов с длительностью фотонной обработки до 8 с. Также полученные данные подтверждаются результатами [8], где после блока химической очистки при температуре 700 °С в процессе БТО световыми импульсами длительностью 10, 20, 40, 80 и 160 с в атмосфере N₂:O₂ (4:3) формировались оксиды разной толщины. Для импульсов длительностью от 40 до 160 с скорость роста оксида кремния была практически постоянной и составила 0,0025 нм/с, однако для процессов с фотонной обработкой в течении 10 с наблюдается возрастание до 0,12 нм/с [8], что также указывает на ускорение роста оксида кремния для процессов с малой длительностью.

В работе [9] предложена модель увеличения скорости реакции окисления в процессе БТО на начальных этапах, где ускоренный рост связан с фотостимулированной реакцией окисления. Ширина запрещенной зоны кремния составляет 1,12 эВ и микроволновое (1–2 мкм) излучение галогенных ламп эффективно поглощается кремниевой подложкой, в результате фотоинжекции будет происходить образование области вблизи границы раздела Si-SiO₂, обогащенной неравновесными носителями заряда. В связи с этим будет возникать разность потенциалов по обеим границам раздела. Электрическое поле способствует переносу заряда через слой оксида и распаду молекулярного кислорода на отрицательно заряженный ион O⁻ и атом O: процесс такого распада имеет значительно меньшую энергии активации, чем фотодиссоциация O₂ на два атома. Импульсы светового потока большей мощности вызовут усиление поля, что, в свою очередь, ускоряет рост толщины оксида. Энергетический барьер между кремнием и растущим окислом при малой толщине слоя SiO₂ составляет 1–2 эВ на начальной стадии окисления и не препятствует инжекции электронов из кремния.

Скорость окисления при этом возрастает за счет увеличения концентрации атомов и ионов окислителя и является, как правило, линейной. Далее, при утолщении пленки оксида кремния и росте барьера уменьшается число распавшихся молекул кислорода.

Импульсы светового потока большей мощности при одностадийном процессе вызвали более эффективное фотостимулированное окисление, что сказалось на толщине пленки оксида кремния. Более длительное окисление при облучении световым потоком меньшей мощности показывает снижение скорости и переход к описаному моделью Дила – Гроува процессу линейно-параболического роста, что может быть связано также с уплотнением верхних слоев кремния и особенно проявляется в случае многостадийных процессов.

На рис. 2 приведены топограммы толщин и показателей преломления тонких пленок SiO₂, полученных окислением в термодиффузионной печи, а также двух- либо трехстадийными процессами БТО. Для термического слоя SiO₂ неравномерность толщины составила 32 %, что больше, чем для оксида кремния, полученного двухэтапным процессом БТО (26 %). Полученные результаты указывают на лучшую для процесса БТО равномерность облучения и нагрева пластины.

При сравнении образцов SiO₂, полученных трехстадийной БТО (две обработки в O₂, а третья в формовочном газе), с оксидами двухстадийной БТО световыми потоками длительностью 12 с, $T_{\max} = 1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ в атмосфере O₂, наблюдается увеличение равномерности оксида кремния на 4 % и небольшое уменьшение его толщины, что является следствием уплотнения оксида кремния в ходе третьей стадии БТО (получение более упорядоченной структуры вследствие ее перестройки). Увеличение равномерности толщины SiO₂ происходит из-за миграции атомов кислорода и кремния по поверхности SiO₂ и его границе с Si, релаксации упругих напряжений и компенсации оборванных связей в оксиде Si с частичной либо полной ликвидацией микропор диаметром 0,5–1,0 нм, присущих SiO₂.

Снижение толщины тонких оксидов кремния может быть обусловлено протеканием реакции разложения SiO₂:



В работе [10] показано, что после обработки оксида кремния толщиной 1,6 нм методом БТО при 1250 °C наблюдается полное испарение SiO₂ с образованием на поверхности нитрида кремния, а при температурах БТО 1150 °C – 1200 °C в N₂ световым импульсом длительностью 60 с после обработки пленок SiO₂ толщиной 2,5 и 1,6 нм наблюдается образование оксинитрида. Из данных, приведенных в табл. 1, видно, что для тонких пленок SiO₂, полученных в процессе БТО под действием фотонного потока длительностью 6 с, $T_{\max} = 1175\text{ }^{\circ}\text{C}$ в атмосфере O₂, значение показателя преломления выше, чем для тонких пленок SiO₂, полученных двухстадийным методом БТО световым импульсом длительностью 12 с в O₂ $T_{\max} = 1250\text{ }^{\circ}\text{C}$, что является следствием получения оксида кремния с лучшими оптическими характеристиками из-за облучения потоком фотонов большей мощности в процессе БТО.

Согласно табл. 1, для пленок оксида кремния, полученных трехстадийным процессом БТО с итоговой обработкой в атмосфере N₂, показатель преломления выше, чем для пленок SiO₂ с завершающей обработкой в формовочном газе. Это обусловлено слабым разупорядочением структуры оксида кремния из-за включения атомов водорода: образование одновалентных -ОН групп приводит к разрыву связей Si-O с участием мостикового кислорода и дополнительному возникновению некомпенсированных связей атомов Si [11].

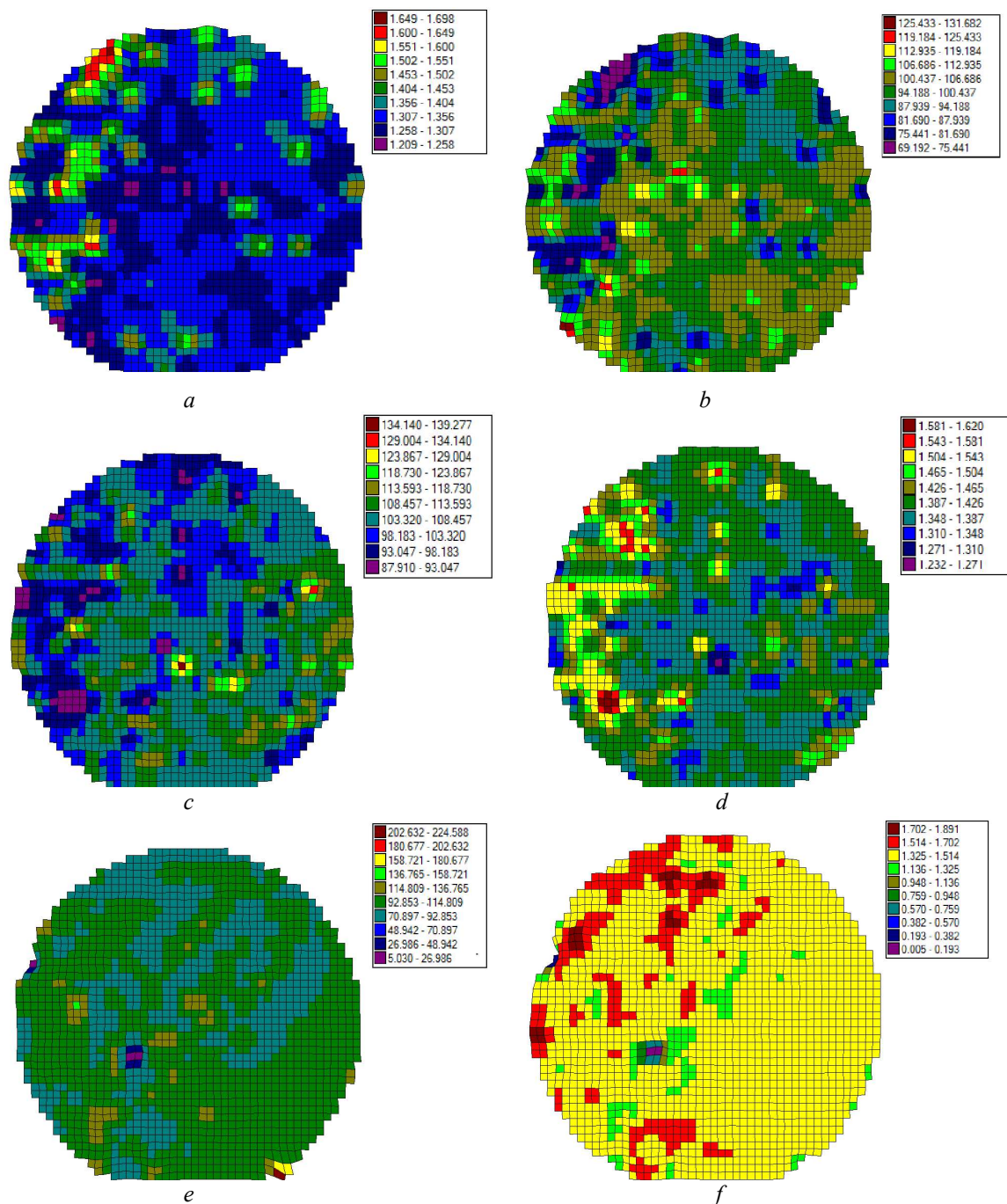


Рис. 2. Топограммы толщин (*a, c, e*) в единицах \AA и показателей преломления (*b, d, f*) термического оксида, полученного при $900\text{ }^\circ\text{C}$ в течении 30 мин, $\langle d \rangle = 9,7\text{ нм}$ (*a, b*) и SiO_2 , полученных методом БТО световым потоком длительностью 12 с, $T_{\text{max}} = 1250\text{ }^\circ\text{C}$: двухстадийным процессом в O_2 $\langle d \rangle = 10,5\text{ нм}$ (*c, d*); трехстадийным процессом (две обработки в атмосфере O_2 , третья в формовочном газе) $\langle d \rangle = 9,7\text{ нм}$ (*e, f*)

Fig. 2. Topograms of thicknesses (*a, c, e*) at \AA units and refractive indices (*b, d, f*) of thermal oxide at $900\text{ }^\circ\text{C}$, $\langle d \rangle = 9,7\text{ nm}$ (*a, b*); and SiO_2 obtained by the RTP method with a luminous flux of 12 s duration $T_{\text{max}} = 1250\text{ }^\circ\text{C}$: two-stage process in O_2 $\langle d \rangle = 10.5\text{ nm}$ (*c, d*); a three-stage process (two treatments in an O_2 atmosphere, the third in a forming gas) $\langle d \rangle = 9.7\text{ nm}$ (*e, f*)

Таблица 1. Показатель преломления оксидов, полученных разными обработками
Table 1. Refractive index of oxides obtained by different treatment

Режимы отжига / Annealing regime			SiO ₂
T_{\max} , °C	τ , с	Атмосфера отжига Annealing atmosphere	n
900	1800	O ₂	1,32
1175	6	O ₂	1,4
1250	12	O ₂	1,35
1250	12	O ₂	
1250	12	O ₂	1,48
1250	12	O ₂	
1250	12	формовочный газ	
1250	12	O ₂	1,51
1250	12	O ₂	
1250	12	N ₂	

Показатель преломления для SiO₂, полученного при длительном термическом отжиге, составляет $n = 1,32$. Для оксида кремния, полученного трехэтапным процессом БТО, показатель преломления возрастает, что указывает на процессы включения атомов азота в структуру SiO₂. Возможным механизмом азотирования оксида является встраивание атомов азота из азотсодержащей среды (N₂ или формовочный газ) в формируемый слой диэлектрика на последнем этапе БТО. Известно, что азот применяется в качестве химически инертной среды в технологических процессах микроэлектроники, однако при отжиге в атмосфере N₂ в температурном диапазоне 1100 – 1300 °C будет происходить реакция прямого азотирования взаимодействие азота с образованием нитрида кремния:



При наличии оксида на поверхности пластины протекание этой реакции будет затруднено. Тем не менее, в работе [10] производился процесс БТО оксидов кремния толщиной 5; 2,5; 1,6 нм в атмосфере N₂ при 1150 – 1250 °C длительностью 60 с. Для пленок SiO₂ толщиной 2,5 нм во всем диапазоне температур происходит увеличение доли азота в структуре Si_xO_yN_z, полученном БТО. При температуре 1250 °C для оксида кремния толщиной 1,6 нм будет происходить полное испарение SiO₂ с поверхности пластины и образование нитрида кремния, но при 1150 °C и 1200 °C формируется оксинитрид, как и в случае обработки оксида кремния толщиной 2,5 нм. При отжиге пластины с пленкой SiO₂ толщиной 5 нм формирование оксинитрида происходит не будет, однако, по мнению авторов [10], возможным является азотирование границы раздела Si-SiO₂. Авторами [12] приведена зависимость показателя преломления при $\lambda = 632,8$ нм Si_xO_yN_z от стехиометрического состава оксинитрида, где было показано, что с увеличением доли азота происходит рост показателя преломления – именно это и получено в ходе исследований для образцов, подвергнутых БТО в формовочном газе либо атмосфере азота. Показатель преломления у оксинитрида толщиной 6,8 нм, азотированного методом имплантации N⁺ дозой $1 \cdot 10^{15}$ см⁻², составил $n = 1,627$ при $\lambda = 632$ нм.

Согласно [12] индекс y в Si_xO_yN_z связан с показателем преломления зависимостью:

$$0,11y^2 - 0,47y + 1,96 = n \quad (3)$$

Структура оксинитрида состоит не из кластеров SiO₂ и Si₃N₄, а из тетраэдров SiO_iN_j, где $i + j = 4$. С учетом валентностей атомов кремния, кислорода и азота согласно правилу Мотта коэффициенты нестехиометрического Si_xO_yN_z связаны соотношением:

$$4x - 2y - 3z = 0 \quad (4)$$

Толщина SiO₂, сформированного одноэтапным процессом БТО световым потоком длительностью 20 с, на 20 % меньше толщины, полученной в течение шестисекундной длительности обработки при той же $T_{\max} = 1150$ °C. При сравнении разностадийных обработок, проводимых световыми импульсами одинаковой длительности установлено, что процесс

окисления кремния на его начальной стадии заметно ускоряется при увеличении мощности облучения. Эти результаты можно связать с протеканием фотостимулированной реакции окисления кремния вследствие диссоциации молекул кислорода. При получении тонких диэлектрических пленок с использованием процесса азотирования методом БТО путем трехстадийного импульсного облучения наблюдается улучшение равномерности толщины слоя на 4 % по сравнению с тонкими пленками SiO_2 , полученными при использовании двухстадийного облучения без процесса азотирования. Это является следствием уплотнения оксида кремния в ходе дополнительных стадий отжига и обусловлено процессами релаксации и компенсации связей, ликвидацией микропор. Процессы азотирования оксида кремния или его границы раздела также способствуют улучшению структуры диэлектрика. Прямым азотированием слоя SiO_2 (толщиной ~ 10 нм) методом БТО в атмосфере N_2 либо в формовочном газе получены диэлектрические пленки с массовой долей азота 4 – 8 %.

Установлено, что для оксидов Si кремния, полученных трехстадийным процессом БТО световым потоком длительностью 12 с, $T_{\text{max}} = 1250$ °С (две стадии в O_2 , третья в формовочном газе) расчетное соотношение атомов в полученном слое $\text{SiO}_{1,72}\text{N}_{0,18}$, что соответствует 4 % массовой доли азота. Тонкие диэлектрические пленки, полученные методом БТО такой же фотонной обработкой (две стадии в O_2 , но третья в N_2) атомы соотносятся как $\text{SiO}_{1,47}\text{N}_{0,35}$ (8 % массовой доли азота).

Заключение

Установлено, что скорость окисления кремния в процессе БТО потоком фотонов длительностью 6, 12 и 20 с в атмосфере кислорода сильно зависит от мощности излучения. Так, толщина слоя SiO_2 , полученного в процессе БТО световым импульсом длительностью 6 с, в 1,2 раза больше, чем оксида кремния, полученного импульсом длительностью 20 с для одной и той же максимальной температуры процесса 1150 °С. Это является следствием протекания фотостимулированной реакции окисления кремния под воздействием мощного излучения, причем фотодиссоциация молекул кислорода будут происходить практически сразу после включения ламп. Возможными механизмами увеличения скорости на начальных стадиях окисления кремния являются двухфотонная диссоциация в газовой фазе и распад молекул кислорода на атомы и отрицательно заряженные ионы под действием электрического поля в слое изолятора, созданного надбарьерной инжекцией носителей заряда, образующегося в кремнии при фотонной обработке.

Для тонкого слоя SiO_2 , полученного окислением в термодифузионной печи, неравномерность толщины оксида кремния ($\langle d \rangle = 9,7$ нм) по поверхности пластины составила 32 %, что больше, чем для тонкого слоя SiO_2 , полученного двухэтапным процессом БТО ($\langle d \rangle = 10,5$ нм) (26 %), это указывает на лучшую равномерность нагрева пластин при БТО. Для трехэтапной обработки неравномерность полученного оксида диэлектрика ($\langle d \rangle = 9,7$ нм) составила 22 %. Небольшое уменьшение толщины и увеличение равномерности может являться следствием уплотнения слоя оксида кремния в ходе третьей стадии фотонной обработки как из-за миграции и перераспределения атомов кислорода и кремния по границам раздела SiO_2 , так и за счет релаксации и компенсации связей в оксиде, а также ликвидации микропор. Другим механизмом улучшения структуры SiO_2 является азотирование его и границы раздела с кремнием.

Установлено, что при фотонной обработке в процессе БТО одним световым импульсом длительностью 12 с и нагревом пластины до $T_{\text{max}} = 1250$ °С в атмосфере азота либо формовочного газа тонких (~ 10 нм) оксидов кремния, полученных методом БТО, будет происходить процесс прямого азотирования SiO_2 . Расчетное соотношение массовой доли атомов азота в полученном слое тонкой диэлектрической пленки составило 8 % после процесса БТО оксида кремния в N_2 и 4 % после процесса БТО в формовочном газе (N_2 97 % + H_2 3 %). Концентрация атомов азота в полученном диэлектрике определялась по правилу Мотта на основании измеренных значений показателя преломления.

References

1. Ahopelto J., Ardila G., Baldi, L. Balestra F., Belot D. NanoElectronics roadmap for Europe: From nanodevices and innovative materials to system integration. *Solid-State Electronics*. Elsevier. 2019;155:7-19. DOI: 10.1016/j.sse.2019.03.014
2. Deleonibus, S. *Electronic Devices Architectures for the NANO-CMOS Era*. Boca Raton: CRC Press; 2019.
3. Krasnikov G.Ya. [*Design and technological features of submicron MOS transistors*]. Tekhnosfera = Technosphere, 2011. (in Russ.)
4. Borisenko V.E. Hesketh P.J. *Rapid Thermal Processing of Semiconductors*. New York: Springer Science+Business Media; 1997.
5. Fair R.B. *Rapid thermal processing: science and technology*. Boston: Academic Press; 1993.
6. Nishi Y. Doering R. *Handbook of semiconductor manufacturing technology*. Boca Raton: CRC press; 2008.
7. Pilipenko V.A. [Thermal oxidation model of silicon during rapid heat treatment] *Bulletin of BSU. Series 1, Physics. Maths. Computer science = Vestnik BGU. Seriya 1, Fizika. Matematika. Informatika*. Minsk: Izd. centr BGU;2006;(2):35-39. (in Russ.)
8. Christiano V., Filho S.G. dos Santos. Physical characterization of ultrathin silicon oxynitrides grown by Rapid Thermal Processing aiming to MOS tunnel devices. *Rio de Janeiro: IOP Conference Series. Materials Science and Engineering. IOP Publishing*. 2015;76:01200.
9. Svetlichny A.M., Shlyakhovoy D.A. [Estimation of the effect of IR radiation on the growth rate of silicon dioxide]. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki = Bulletin of the Southern Federal University. Technical science*. 2000;17(3). (in Russ.)
10. Lu Z.H. Growth of ultrathin nitride on Si (100) by rapid thermal N₂ treatment. *Rapid Thermal and Other Short-time Processing Technologies: Proceedings of international symposium*. 2000;(9): 223-229.
11. Korolev M. A., Krupkina T. Y., Reveleva M.A. [Technology, designs and methods of modeling silicon integrated circuits]. Moscow: Binom. Knowledge laboratory; 2015. (in Russ.)
12. Gritsenko V.A. [Atomic structure of amorphous nonstoichiometric silicon oxides and nitrides]. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Physics-Uspekhi* 2008;178(7):727-737. (in Russ.)
13. Diniz J.A. Formation of Ultra-Thin Silicon Oxynitride Films by Low-Energy Nitrogen Implantation. *MRS Online Proceedings Library Archive*. 1995;396:249-254. DOI: 10.1557/PROC-396-249.

Вклад авторов

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

Омельченко А.А. провела измерения оптических характеристик полученных образцов, принимала участие в обсуждении результатов.

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

Authors' contribution

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

Omelchenko A.A. carried out measurements of the optical characteristics of the obtained samples, took part 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 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 Государственного центра «Белмикрoанализ» ОАО «Интеграл».

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

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

Шестовский Д.В., инженер-технолог отдела перспективных технологических процессов ОАО «Интеграл».

Адрес для корреспонденции

220108, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Казинца, 121А,
ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга ОАО «Интеграл»
тел. +375-17-212-37-41;
e-mail: office@bms.by
Пилипенко Владимир Александрович

Information about the authors

Kovalchuk N.S., PhD, Associate 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”.

Pilipenko V.A., D.Sc., Professor, Corresponding Member of the NAS of Belarus, Deputy Director for Scientific Development of the «Belmicroanalysis» State Center of the JSC “Integral”.

Solodukha V.A., D.Sc., General Director of the JSC “Integral” – “Integral” Holding Managing Company.

Shestovski D.V., Engineer-Technologist of the Advanced Technological Processes Department of the JSC “Integral”.

Address for correspondence

220108, Republic of Belarus,
Minsk, Kazintsa str., 121A,
JSC «Integral» – «Integral» Holding Managing Company
tel. +375-17-212-37-41;
e-mail: office@bms.by
Pilipenko Vladimir Aleksandrovich