

СПЕКТРЫ НАРУШЕННОГО ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ АЗОТИРОВАННЫХ СТРУКТУР SiO₂/Si

Оджаев В.Б.¹, Петлицкий А.Н.², Просолович В.С.^{1*}, Ковальчук Н.С.², Соловьев Я.А.²,
Жигулин Д.В.², Шестовский Д.В.², Янковский Ю.Н.¹, Бринкевич Д.И.¹

¹Белорусский государственный университет, пр-кт Независимости, 4, 220030,

Минск, Беларусь, prosolovich@bsu.by

²Открытое акционерное общество «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга
«ИНТЕГРАЛ», ул. Казинца И.П., д.121А, 220108, Минск, Беларусь

(Поступила в редакцию мая 2022)

Методами нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) и времяпролетной масс-спектрометрии вторичных ионов (TOF-SIMS) изучено поведение азота в пленках диоксида кремния на подложках монокристаллического кремния. Азот в диэлектрик, сформированный методом пирогенного окисления при температуре 850 °С в атмосфере влажного кислорода, вводился имплантацией ионов N⁺ энергией 40 кэВ дозами $2,5 \cdot 10^{14}$ и $1,0 \cdot 10^{15}$ см⁻² с последующим быстрым термическим отжигом при температуре 1000 °С либо 1050 °С длительностью 15 с на воздухе. Азотирование части образцов осуществлялось при термическом отжиге в атмосфере азота с добавлением малого количества кислорода при температуре 1200 °С в течении 120 минут. Установлено, что при проведении термообработок основная часть атомов азота диффундирует к границе раздела SiO₂/Si и накапливается в приграничной области оксида. В спектрах НПВО наблюдалась полоса поглощения с двумя максимумами при ~ 2320 и 2360 см⁻¹, которая, вероятно, обусловлена колебаниями двойных кумулятивных связей типа O=Si=N-. Формирование данных связей обусловлено взаимодействием азота с оборванными связями на границе раздела кремний-диэлектрик, вследствие чего не-скомпенсированные или напряженные связи заменяются на более устойчивые.

Ключевые слова: подзатворный диэлектрик; ионная имплантация; термообработка; нарушенное полное внутреннее отражение

SPECTRA OF DISTURBED TOTAL INTERNAL REFLECTION OF NITRIDED SiO₂/Si STRUCTURES

Odzhaev V.B.¹, Pyatlitski A.N.², Prosolovich V.S.^{1*}, Kovalchuk N.S.², Soloviev Ya.A.²,
Zhygulin D.V.², Shestovsky D.V.², Yankovski Yu.N.¹, Brinkevich D.I.¹

¹Belarusian state University, 4 Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Belarus,

²JSC «INTEGRAL» – «INTEGRAL» Holding Managing Company, 121A Kazintsa Street,
220108, Minsk, Belarus

Annotation

The behavior of nitrogen in silicon dioxide films on single-crystal silicon substrates was studied by attenuated total reflection (ATR) and time-of-flight secondary ion mass spectrometry (TOF-SIMS). Nitrogen was introduced into a dielectric formed by pyrogenic oxidation at a temperature of 850 °C in an atmosphere of wet oxygen by implantation of N⁺ ions with an energy of 40 keV at doses of $2.5 \cdot 10^{14}$ and $1.0 \cdot 10^{15}$ cm⁻², followed by rapid thermal annealing at a temperature of 1000 °C or 1050 °C with a duration of 15 s in air. Nitridization of some of the samples was carried out during thermal annealing in a nitrogen atmosphere with the addition of a small amount of oxygen at a temperature of 1200 °C for 120 minutes. It has been established that during heat treatments, the main part of nitrogen atoms diffuses to the SiO₂/Si interface and accumulates in the near-boundary region of the oxide. The ATR spectra showed an absorption band with two maxima at ~2320 and 2360 cm⁻¹, which is probably due to vibrations of double cumulative bonds of the O=Si=N– type. The formation of these bonds is due to the interaction of nitrogen with dangling bonds at the silicon-dielectric interface, as a result of which uncompensated or strained bonds are replaced by more stable ones. The resulting stronger chemical bonds prevent charge accumulation on the surface of the SiO₂/Si interface.

Key words: gate dielectric; heat treatment; ion implantation; disturbed total internal reflection

Введение

Определяющим фактором, оказывающим влияние на эксплуатационные параметры и надежность силовых МОП-транзисторов на основе кремния, является качество слоев подзатворного SiO₂ и его границы раздела с Si [1,2]. Ультратонкие оксинитридные пленки (SiO_xN_y) используются в качестве подзатворного диэлектрика для субмикронных МОП-приборов вследствие их высокой радиационной стойкости, малого сдвига порогового напряжения, высокой диэлектрической проницаемости и низкого коэффициента диффузии примесей [3]. В работах [4,5] для получаемых тонких и ультратонких подзатворных оксидов кремния логических элементов МОП-транзисторов интегральных схем (ИС) предложены способы снижения концентрации зарядовых центров и увеличения электрической прочности диэлектрика методом проведения нитрирования в атмосфере с

добавлением NH_3 , NO , NO_2 либо плазмостимулированными процессами. Основным недостатком применения метода нитрирования в атмосфере с добавлением NH_3 является образование большого количества ловушек на границе раздела SiO_2/Si , обусловленных включением атомов водорода из атмосферы реактора. К недостаткам процессов нитрирования можно отнести также технологические сложности получения слоев на основе оксида кремния с заданной концентрацией азота. В отличие от вышеуказанных методов азотирование оксида затвора методом ионной имплантации (ИИ) представляет интерес ввиду возможности локального и прецизионного введения требуемого количества атомов. Так же представляет интерес азотирование оксида затвора путем отжига в атмосфере N_2 при высоких температурах ввиду низкой стоимости N_2 высокой чистоты и его широкого практического применения в высокотехнологичных отраслях производства. Авторами [2] предположено, что увеличение заряда пробоя подзатворного диэлектрика и снижение тока утечки затвора для МОП-транзисторов, сформированных с применением дополнительной ИИ азота, может быть обусловлено его взаимодействием в процессе постимплантационного отжига с оборванными связями атомных слоев границы раздела SiO_2/Si . В результате этого образуются более прочные химические связи, препятствующие накоплению заряда на поверхности границы раздела SiO_2/Si .

Однако в настоящий момент отсутствуют прямые экспериментальные данные о взаимодействии и локализации атомов N, O, Si в слоях оксида кремния толщиной более 15 нм, азотированных методом ИИ. Отсутствуют также данные о проведении исследований свойств подзатворных оксидов кремния, азотированных высокотемпературным отжигом в атмосфере N_2 . Метод ИК-спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) позволяет проводить структурный, качественный и количественный анализ веществ, находящихся в конденсированном состоянии, в том числе и структур SiO_2 на кремнии [6]. Целью настоящей работы являлось исследование ИК-спектроскопии НПВО подзатворных оксидов кремния, азотированных как методом ИИ, так и азотированных высокотемпературным отжигом в атмосфере N_2 .

Методика приготовления образцов и проведения измерений

В качестве исходных образцов применялись пластины монокристаллического кремния ориентацией (100) p-типа проводимости с удельным электрическим сопротивлением 0,005 и 12 Ом·см с основной легирующей примесью бора. В таблице приведены различные технологические операции обработки экспериментальных образцов. Изначально для всех исследовавшихся образцов производилось предварительное

термическое окисление: формировался SiO_2 толщиной 100 нм для ликвидации механически-нарушенного поверхностного слоя Si пластин. Затем предварительный оксид кремния полностью удалялся жидкостным травлением и проводилась химическая очистка поверхности пластин согласно методики RCA [7].

Для одной группы пластин (образцы 2-5, 9-12 таблица) методом пирогенного окисления в атмосфере влажного кислорода при температуре 850 °C выращивался защитный слой SiO_2 толщиной ~23 нм. Затем через защитный оксид кремния имплантировали ионы азота с энергией 40 кэВ и дозами $2,5 \cdot 10^{14}$ и $1,0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. После ИИ азота пластины подвергались химической очистке методом RCA. Процесс быстрой термообработки (БТО) пластин проводился при температуре 1000 °C либо 1050 °C длительностью 15 с на воздухе. После БТО жидкостным травлением на части пластин (образцы 3, 5, 10 и 12 таблица) удаляли защитный SiO_2 и проводилась химическая очистка поверхности методом RCA. Затем для этой группы пластин (образцы 3, 5, 10 и 12 таблица) формировался подзатворный термический оксид толщиной ~44 нм методом пирогенного окисления при температуре 850 °C в атмосфере влажного кислорода. На образцах 2, 4, 9 и 11 защитный SiO_2 толщиной ~23 нм не удалялся, исследования НПВО и TOF-SIMS осуществлялось непосредственно на защитном оксиде.

На образце 7 (таблица) производилось наращивание термического подзатворного оксида кремния толщиной ~44 нм режимами, указанными в предыдущем абзаце. Затем он подвергался термическому отжигу в атмосфере азота с добавлением малого количества кислорода при температуре 1200 °C в течении 2 ч.

Спектры НПВО структур SiO_2/Si регистрировались в диапазоне $\nu = 400\text{--}4000 \text{ см}^{-1}$ при комнатной температуре ИК-Фурье спектрофотометром *ALPHA (Bruker Optik GmbH)* [8]. Разрешение составляло 2 см^{-1} , количество сканов – 24. Коррекция фона проводилась перед каждым измерением.

Профили распределения азота по глубине в структурах диэлектрик-кремний определялись методом времяпролетной масс-спектрометрии вторичных ионов (TOF-SIMS) системой TOF.SIMS 5 (IONTOF, Germany) с чувствительностью не хуже $5 \cdot 10^{15}\text{--}1 \cdot 10^{16} \text{ ат/см}^3$. Травление образцов в процессе исследований производилось пучком ионов Cs^+ с величиной тока 100 нА, ускоряемыми напряжением 2 кэВ. Измерение объёмной концентрации примесей производилось в импульсном режиме со временем цикла 50-100 мкс. В качестве первичных применялись ионы Bi^+ , ускоряемые напряжением 30 кэВ.

Таблица – Операции обработки экспериментальных образцов

№ образца	Удельное сопротивление, Ом·см	Толщина защитного оксида, нм	Доза имплантации N ⁺ , см ⁻² (энергия 40 кэВ)	Температура БТО, °С (длительность 15 с)	Снятие защитного окисления	Толщина подзатворного оксида, нм	Температура отжига в атмосфере N ₂ , °С (длительность 120 мин.)
2	0,005	23	$2,5 \cdot 10^{14}$	1000	-	-	-
3	0,005	23	$2,5 \cdot 10^{14}$	1000	+	44	-
4	12	23	$2,5 \cdot 10^{14}$	1000	-	-	-
5	12	23	$2,5 \cdot 10^{14}$	1000	+	44	-
7	12	-	-	-	+	44	1200
9	0,005	23	$1,0 \cdot 10^{15}$	1000	-	-	-
10	0,005	23	$1,0 \cdot 10^{15}$	1000	+	44	-
11	12	23	$1,0 \cdot 10^{15}$	1000	-	-	-
12	12	23	$1,0 \cdot 10^{15}$	1000	+	44	-

*) Номера образцов указаны в соответствии с их номерами при запуске в технологический процесс

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Спектры нарушенного полного внутреннего отражения исследовавшихся структур SiO_2/Si существенно отличались от спектров поглощения пластин монокристаллического кремния. Так, в спектрах НПВО структур SiO_2/Si (рис.1) отсутствовала полоса поглощения с максимумом при $\sim 1100 \text{ см}^{-1}$, обусловленная колебаниями междоузельного кислорода в кремнии [9]. Полоса решеточного поглощения кремния при $\sim 610 \text{ см}^{-1}$, связанная с углеродом в положении замещения, была слабо выражена на фоне шумов. Для всех исследовавшихся образцов регистрировалась полоса при $\sim 510 \text{ см}^{-1}$, обусловленная электронными переходами из основного в возбужденное состояние двухзарядных кремний-кислородных комплексов в нейтральном зарядовом состоянии [10]. Наблюдались также полоса с максимумом при 1007 см^{-1} и две полосы с максимумами при ~ 1160 и 1240 см^{-1} (рис.2а). Указанные полосы наблюдались ранее в спектрах пропускания слоев диоксида полученных разными методами - электронно-лучевым испарением [11] и термодеструкцией полиорганосилоксанов [12]. Полоса с максимумом при 1007 см^{-1} обусловлена валентными антисимметричными колебаниями мостиковых групп Si-O-Si в оксиде кремния [12]. Полосы с максимумами при ~ 1160 и 1240 см^{-1} связаны с комплексами Si_xO_y [13].

Интенсивность полос при ~ 1160 и 1240 см^{-1} существенным образом варьировалась от образца к образцу и практически не зависела как от дозы имплантации N^+ , так и режима термообработки в атмосфере азота. Она была выше в образцах 3 и 7, которые подвергались как ИИ азота дозой $2,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ с энергией 40 кэВ через защитный оксид с последующим его удалением и наращиванием подзатворного диэлектрика толщиной ~ 44 нм (образец 3), так и термическому окислению для формирования подзатворного диэлектрика толщиной ~ 44 нм во влажном кислороде с последующей термообработкой при 1200°C в течение 120 минут в атмосфере азота (образец 7). Данные полосы были наиболее интенсивны в спектре образца 7, в который ионная имплантация не проводилась (рис.3). Отсутствие зависимости интенсивности указанных полос от дозы имплантированного азота, а также режимов термообработки в азотсодержащей атмосфере не позволяет связать данные полосы с примесью азота. Анализ полос поглощения в диапазоне волновых чисел $< 1500 \text{ см}^{-1}$ был затруднен вследствие резкого возрастания фонового поглощения с уменьшением волнового числа (рис.1), обусловленного, вероятнее всего, процессами рассеяния/поглощения на границах раздела воздух/ SiO_2 и SiO_2/Si , а также решеточным поглощением монокристаллического кремния [14].

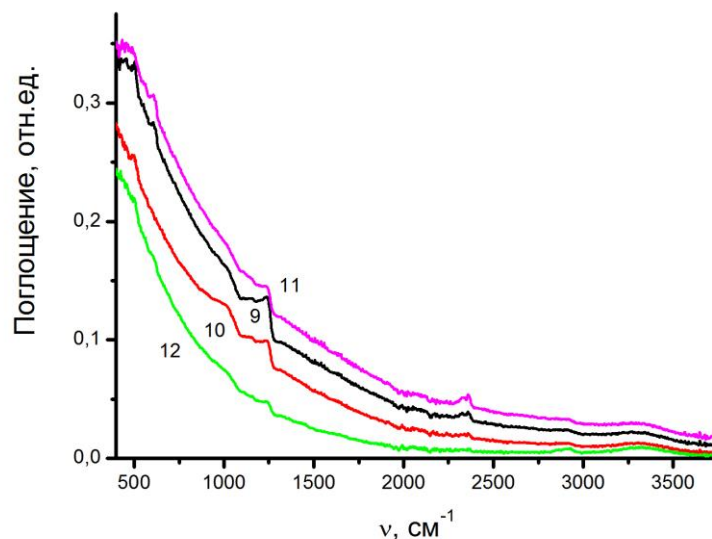


Рис.1. Спектры НПВО образцов 9,10,11 и 12, имплантированных ионами N^+ ($D=1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, $E=40 \text{ кэВ}$). Кривые 9 и 11 соответствуют образцам без удаления защитного оксида после ИИ. Номера кривых соответствуют номерам образцов в таблице.

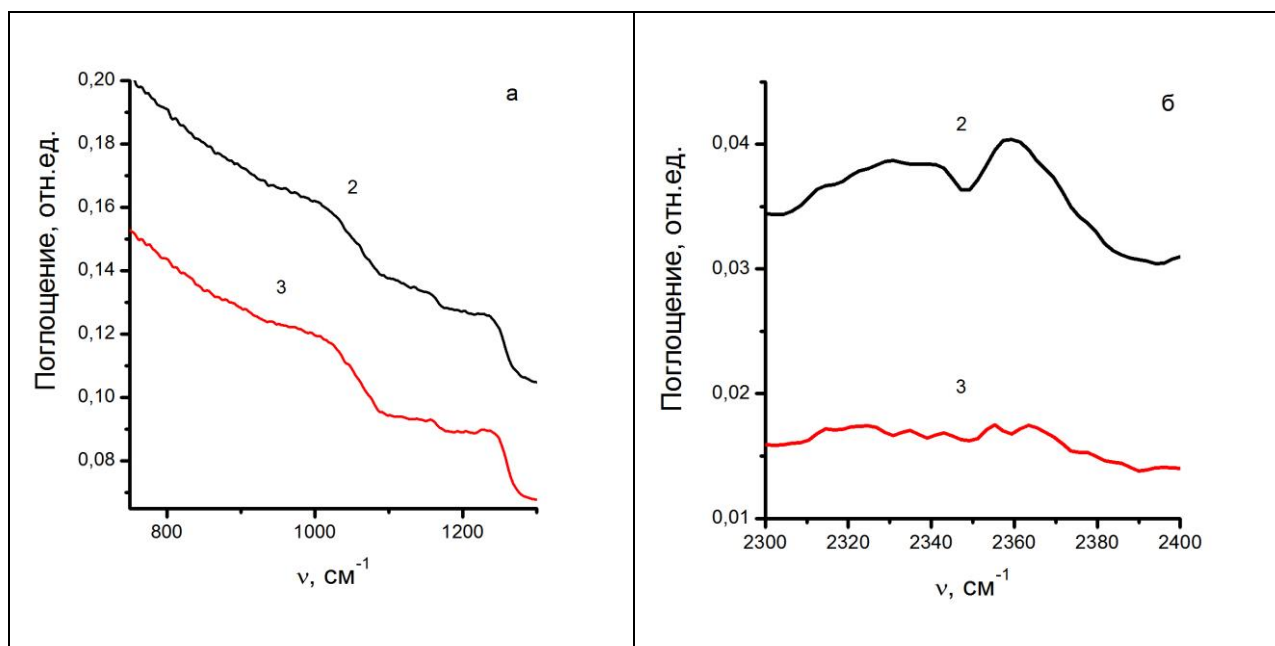


Рис.2. Спектры НПВО образцов 2 и 3, имплантированных ионами N^+ ($D=2,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, $E=40 \text{ кэВ}$). Кривые 2 соответствуют образцам без удаления защитный оксида после ИИ. Кривые 3 соответствуют образцам, на которых после ИИ и БТО был удален защитный оксид. Номера кривых соответствуют номерам образцов в таблице.

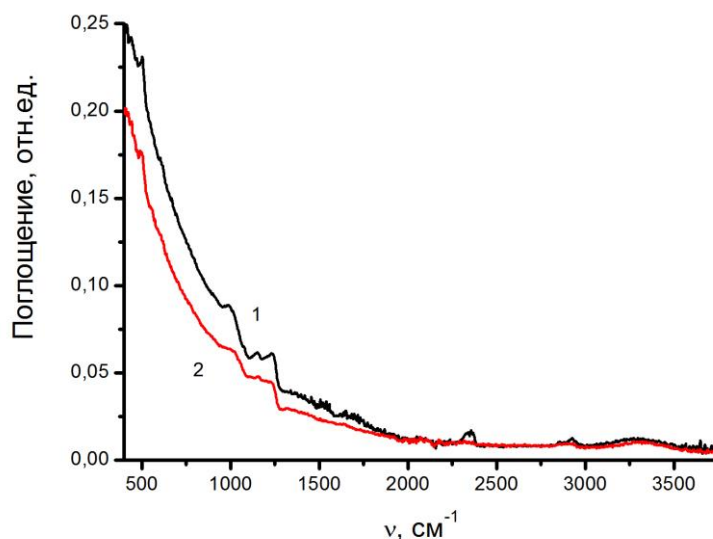


Рис.3. Спектры НПВО образца 7, отожженного в атмосфере N_2 ($T=1200\text{ }^{\circ}C$, $t=120$ мин.). Измерения с рабочей (1) и обратной (2) стороны пластины.

Полос поглощения в области $800\text{--}900\text{ см}^{-1}$, наблюдавшихся ранее в нитриде кремния [15] и обусловленных колебаниями связей Si-N, обнаружено не было. Это связано, по всей видимости, с их низкой интенсивностью относительно фонового поглощения.

В областях волновых чисел $2900\text{--}3000$ и $3250\text{--}3600\text{ см}^{-1}$ в спектрах НПВО структур SiO_2/Si , как имплантированных ионами азота, так и подвергавшимся термообработке в азотсодержащей атмосфере, наблюдались низкоинтенсивные полосы, связанные с примесью водорода (рис.4). Колебания в области $2900\text{--}3000$ обычно связывают с поглощением C-H связями [16]. Широкая полоса низкой интенсивности в диапазоне $3250\text{--}3600\text{ см}^{-1}$ обусловлена валентными колебаниями O-H – гидроксильных групп в оксиде. В спектрах НПВО она наблюдалась также авторами [17]. Указанная полоса может быть обусловлена адсорбированной водой и гидроксильными группами, содержащимися в SiO_2/Si структурах после технологических обработок при формировании пирогенного оксида в атмосфере влажного кислорода. Водород может также поступать из данной атмосферы. Указанные полосы наблюдаются практически во всех образцах, однако провести их детальный анализ вследствие их низкой интенсивности не представлялось возможным.

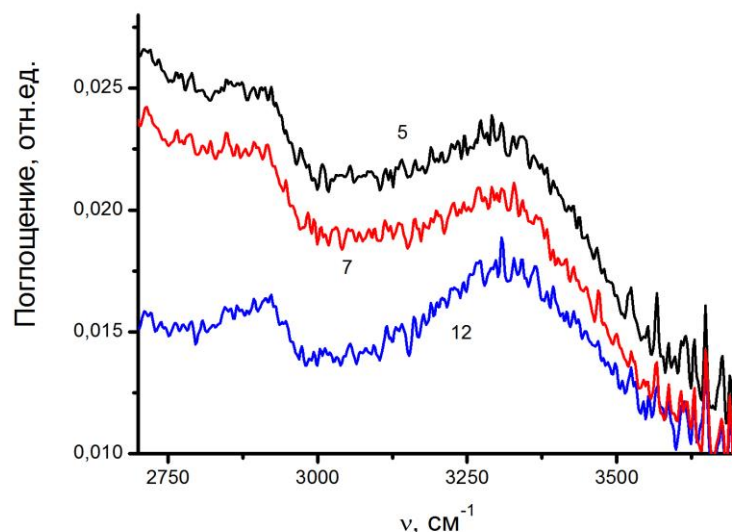


Рис.4. Спектры НПВО азотированных структур SiO₂/Si. Номера кривых соответствуют номерам образцов в таблице.

В спектрах НПВО имплантированных структур SiO₂/Si наблюдалась достаточно интенсивная полоса с двумя максимумами при ~ 2320 и 2360 см^{-1} (рис.1 и рис.2б), не характерная для монокристаллического кремния. Окончательно природа этой полосы до настоящего времени не установлена. Указанная полоса была обнаружена в образцах, имплантированных азотом через защитный слой SiO₂ толщиной $\sim 23 \text{ нм}$ (кривая 2 рис.2б). Она отсутствует во всех образцах, которые подвергались снятию защитного оксида после проведения ионной имплантации N⁺ и последующему окислению в атмосфере влажного кислорода (кривая 3 рис.2б). Как видно из приведенных на рис. 5 профилей распределения азота, определенных методом времяпролетной масс-спектрометрии вторичных ионов, при проведении БТО основная часть атомов азота диффундирует к границе раздела SiO₂/Si и накапливается в приграничной области оксида. При этом концентрация азота в защитном оксиде толщиной $\sim 23 \text{ нм}$ для образцов 2 и 9 почти на два порядка превышает соответствующее значение в подзатворном оксиде, сформированном на образцах 3 и 10 после удаления защитного оксида, проведения БТО и последующего формирования подзатворного диэлектрика толщиной $\sim 44 \text{ нм}$. Следовательно, основная часть имплантированного азота во втором случае была удалена из образцов при снятии защитного диэлектрика, что не позволяет зарегистрировать указанные выше полосы в образцах, подвергавшихся удалению защитного диоксида. Полоса с двумя максимумами при ~ 2320 и 2360 см^{-1} наблюдалась также и в подзатворном диэлектрике толщиной ~ 44

нм, подвергавшемся термообработке в атмосфере азота при 1200 °С в течение 120 минут (рис.3). Ранее в [18] было показано, что в диффузионно-легированном азотом кремнии атомы N находятся преимущественно в междоузельном положении и активно взаимодействуют с междоузельными атомами кислорода с образованием N_xO_y -комплексов. Аналогичные результаты получены также для монокристаллического кремния, легированного азотом в процессе выращивания из расплава по методу Чохральского [19].

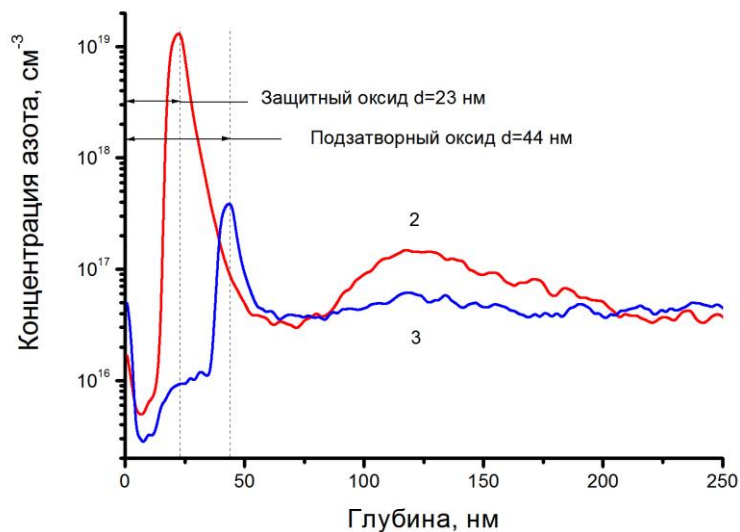
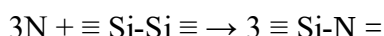


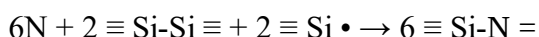
Рис. 5. Профили распределения атомов азота после имплантации ($D=5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, $E=40 \text{ кэВ}$) и быстрого термического отжига. Номера кривых соответствуют номерам образцов в таблице.

Согласно проведенным расчетам методом SRIM проецированный пробег ионов при имплантации N^+ с энергией 40 кэВ составляет $\sim 110 \text{ нм}$ (что подтверждается и экспериментальными результатами (см. кривую 2 рис.5). Граница раздела представляет собой тонкий переходный слой нестехиометрического состава SiO_x , в котором кремний имеет степени окисления Si^+ , Si_2^+ и Si_3^+ и образует свойственные только границе раздела группировки атомов: поверхностные состояния, дефекты, возникшие на границе вследствие несовпадения периодов решеток [20]. В процессе постимплантационной быстрой термической обработки, как было предположено ранее [21], атомы азота диффундируют к границе раздела SiO_2/Si и вступают во взаимодействие с атомами кремния и кислорода. Диффузия азота обусловлена градиентом его концентраций и возникшими напряжениями в кристаллической решетке.

При формировании слоя азотированного оксида атомы азота взаимодействуют с оборванными связями атомов кремния, что приводит к образованию новых Si-N связей:



Азот вступает в химическое взаимодействие также и с P_b дефектами (дефекты класса $\text{P}_b \equiv \text{Si}_3\text{Si} \cdot$ с одной не скомпенсированной ковалентной связью атома кремния [22]), в результате чего происходит образование Si-N связей, при этом плотность поверхностных состояний на границе кремний/оксинитрид кремния уменьшается.



Экспериментальные данные позволяют связать полосу с двумя максимумами при $\sim 2320 \text{ см}^{-1}$ и 2360 см^{-1} с образованием азотсодержащих связей в слое SiO_2 . Диапазон волновых чисел $1900\text{--}2500 \text{ см}^{-1}$ характерен для колебаний двойных кумулятивных связей типа X=Y=Z (например, O=Si=N-). В данной спектральной области могут наблюдаться и полосы поглощения колебаниями тройных связей типа $-\text{Si}\equiv\text{N}$ [16]. Отметим, что в спектре поглощения молекул NO^+ в области волновых чисел $2230\text{--}2370 \text{ см}^{-1}$ авторами [16] также наблюдалась линия поглощения, что является косвенным подтверждением высказанного выше предположения.

Таким образом при постимплантационной быстрой термической обработке в как в защитном оксиде, так и в подзатворном диэлектрике, подвергавшемся термообработке в атмосфере азота при 1200°C в течение 120 минут, происходит локализация большей части концентрации атомов азота в области нестехиометрической части границы раздела Si/SiO_2 . Атомы азота, взаимодействуя с оборванными связями, заменяя не скомпенсированные или напряженные связи на более устойчивые, интегрируются на границе раздела, находя для себя ниши соответственно величине атомного радиуса (ковалентный радиус азота – $0,7 \text{ \AA}$, кремния – $1,175 \text{ \AA}$) и, вследствие этого, образуют более прочные связи, чем в объеме Si. В составе данных связей могут присутствовать как атомы кремния, так и атомы кислорода и/или азота.

Заключение

Проведение азотирования диэлектрика как методом ионной имплантации с последующим постимплантационным быстрым термическим отжигом, так и при термической обработке в атмосфере азота приводит к накоплению азота на границе раздела кремний-диэлектрик. При этом в спектрах нарушенного полного внутреннего отражения появляется полоса поглощения с двумя максимумами при ~ 2320 и 2360 см^{-1} . Данный спектральный диапазон характерен для колебаний двойных кумулятивных связей

типа $O=Si=N-$. Формирование данных связей обусловлено взаимодействием азота с оборванными связями на границе раздела кремний-диэлектрик, вследствие чего не скомпенсированные или напряженные связи заменяются на более устойчивые.

Литература

- [1] **B.J. Baliga.** . Advanced power MOSFET concepts, Springer Science & Business Media, (2010)
- [2] **В.Б. Оджаев, А.Н. Петлицкий, В.С. Просолович, А.С. Турцевич, С.В. Шведов, В.А. Филипеня, В.В. Черный, В.Ю. Явид, Ю.Н. Янковский, В.А. Дубровский.** Весці НАНБ, Сер. фіз.-тэх. навук., № 4. (2014) 4–17
- [3] **J. A. Diniz, P. J. Tatsch, L. C. Kretly, J. E. C. Queiroz., Fo. J. Godoy.** Mat. Res. Soc. Symp. Proc., **396** (1996) 249–254
- [4] **L.S. Adam, C. Bowen, M.E. Law.** IEEE Transactions on Electron Devices. **50**, N 3 (2003) 589–600
- [5] **Г.Я. Красников.** Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП транзисторов. М., ТЕХНОСФЕРА.(2011)
- [6] **M.Milosevic.** М., Milosevic. John Wiley & Sons, **176** (2012) 244
- [7] **Y. Nishi, R. Doering.** Handbook of semiconductor manufacturing technology. Boca Raton: CRC press, (2008)
- [8] **Д.И. Бринкевич, С.Д. Бринкевич, А.Н. Петлицкий, В.С. Просолович.** Микроэлектроника, **50**, № 4(2021)274–280 [**D.I. Brinkevich, S.D. Brinkevich, A.N. Petlitsky, V.S. Prosolovich.** Russian Microelectronics, **50**, № 4(2021)239–245]
- [9] **Д.И. Бринкевич, В.В. Петров.** Журнал прикладной спектроскопии, **46**, № 2(1987) 305–307
- [10] **В.П. Маркевич, Л.И. Мурин, J.L. Lindström, M. Suezawa.** Физика и техника полупроводников, **34**, вып. 9(2000)1039–1045
- [11] **А.Г. Паулиш, А.К. Дмитриев, А.В. Гельфанд, С.М. Пыргаева.** Автометрия, **55**, № 5(2019) 101–106
- [12] **А.А. Намакшинас, О.Д. Хорозова, В.В. Сахаров.** Успехи в химии и химической технологии, **30**, № 7(2016)74–76
- [13] **Д.И. Бринкевич, В.Б. Оджаев, А.Н. Петлицкий, В.С. Просолович.** Микроэлектроника, **40**, № 4(2011) 309–312 [**D.I. Brinkevich, V.B. Odzhaev, A.N. Petliskii, V.S. Prosolovich.** Russian Microelectronics, **40**, № 4(2011)290–293]
- [14] **Ж. Панков.** Оптические процессы в полупроводниках, М., Мир, (1973)

- [15] **В.И. Бачурин, П.А. Лепшин, В.К. Смирнов, А.Б. Чурилов.** Письма в ЖТФ, **24**, № 6 (1998) 18–23
- [16] **Б.Н. Тарасевич.** ИК спектры основных классов органических соединений. Справочные материалы, М., МГУ (2012)
- [17] **Б.И. Селезнев, Д.Г. Федоров.** Вестник Новгородского государственного университета, №5(103), (2017) 114–118
- [18] **М. Tajima, T. Masui, T. Abe, T. Jap.** J. Appl. Phys., **20**, N 6 (1981)L423–L425
- [19] **M.W. Qi, S.S. Tan, B. Zhu, P.X. Cai, W.F. Gu, X.M. Xu, T.S. Shi, D.L. Que, L.B. Li.** J. Appl. Phys., **69**, N 6 (1991)3775–3777
- [20] **Н.Н. Берченко, Ю.В. Медведев.** Успехи химии, **63**, № 8 (1994) 655–672
- [21] **В.Б. Оджаев, А.К. Панфиленко, А.Н. Петлицкий, В.С. Просолович, Н.С. Ковальчук, Я.А. Соловьев, В.А. Филипеня, Д.В. Шестовский.** Журнал Белорусского государственного университета. Физика, №3 (2020) 55–64
- [22] **В.А. Гриценко.** Успехи физических наук, **179**, № 9 (2009) 921–930