

СПЕКТРЫ НАРУШЕННОГО ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ АЗОТИРОВАННЫХ СТРУКТУР SiO₂/Si

В. Б. Оджаев¹, А. Н. Петлицкий², В. С. Просолович^{1*}, Н. С. Ковальчук², Я. А. Соловьев²,
Д. В. Жигулин², Д. В. Шестовский², Ю. Н. Янковский¹, Д. И. Бринкевич¹

УДК 535.3

<https://doi.org/10.47612/0514-7506-2022-89-4-498-504>

¹ Белорусский государственный университет,
Минск, Беларусь; e-mail: prosolovich@bsu.by

² ОАО “ИНТЕГРАЛ” — управляющая компания холдинга “ИНТЕГРАЛ”, Минск, Беларусь

(Поступила 11 мая 2022)

Методами нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) и времяпролетной масс-спектрометрии вторичных ионов изучено поведение азота в пленках диоксида кремния на подложках монокристаллического кремния. Азот вводился в диэлектрик, сформированный методом пирогенного окисления при температуре 850 °C в атмосфере влажного кислорода, 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 либо 1050 °C длительностью 15 с на воздухе. Азотирование части образцов осуществлялось при термическом отжиге в атмосфере азота с добавлением малого количества кислорода при температуре 1200 °C в течение 120 мин. Установлено, что при термообработке основная часть атомов азота диффундирует к границе раздела SiO₂/Si и накапливается в приграничной области оксида. В спектрах НПВО наблюдается полоса поглощения с максимумами при ~2320 и 2360 см⁻¹, обусловленная колебаниями двойных кумулятивных связей типа O=Si=N-. Формирование данных связей обусловлено взаимодействием азота с оборванными связями на границе раздела кремний-диэлектрик, вследствие чего нескомпенсированные или напряженные связи заменяются на более устойчивые.

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

We studied the behavior of nitrogen in silicon dioxide films on single-crystal silicon substrates by the attenuated total reflection (ATR) method and time-of-flight secondary ion mass spectrometry. 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 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 is established that during heat treatments, the majority of nitrogen atoms diffuse to the SiO₂/Si interface and accumulate in the near-boundary region of the oxide. The ATR spectra show an absorption band with 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.

Keywords: gate dielectric, heat treatment, ion implantation, attenuated total reflection.

SPECTRA OF ATTENUATED TOTAL REFLECTION OF NITRIDED SiO₂/Si STRUCTURES

V. B. Odzhaev¹, A. N. Pyatlitski², V. S. Prosolovich^{1*}, N. S. Kovalchuk², Ya. A. Soloviev²,
D. V. Zhygulin², D. V. Shestovsky², Yu. N. Yankovski¹, D. I. Brinkevich¹ (¹ Belarusian State University,
Minsk, Belarus; e-mail: prosolovich@bsu.by; ² JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing
Company, Minsk, Belarus)

Введение. На эксплуатационные параметры и надежность силовых МОП-транзисторов на основе кремния оказывает влияние качество слоев подзатворного SiO_2 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 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 нитрирования в атмосфере с добавлением NH_3 , NO, NO_2 либо плазмостимулированными процессами. Основным недостатком 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 представляет интерес ввиду возможности локального и прецизионного введения требуемого количества атомов. Также представляет интерес азотирование оксида затвора путем отжига в атмосфере N_2 при высоких температурах ввиду низкой стоимости N_2 высокой чистоты и его широкого применения в высокотехнологичных отраслях производства. В [2] предположено, что увеличение заряда пробоя подзатворного диэлектрика и снижение тока утечки затвора для МОП-транзисторов, сформированных с применением дополнительной имплантации ионами 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 .

В настоящее время отсутствуют прямые экспериментальные данные о взаимодействии и локализации атомов N, O, Si в слоях оксида кремния толщиной >15 нм, азотированных методом имплантации ионами, а также об исследовании 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 структур SiO_2 на кремнии [6].

В настоящей работе методом ИК-спектроскопии НПВО исследованы подзатворные оксиды кремния, азотированные методами ионной имплантации и высокотемпературного отжига в атмосфере N_2 .

Эксперимент. 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 табл. 1 представлены различные технологические операции обработки экспериментальных образцов. Для всех образцов проводилось 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 методике, разработанной Radio Corporation of America (RCA) [7].

Для одной группы пластин (образцы 2—5, 9—12) 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 $1.0 \cdot 10^{15}$ см⁻². После имплантации ионами азота пластины подвергались химической очистке методом RCA. Быстрая термообработка пластин осуществлялась при 1000 либо 1050 °C в течение 15 с на воздухе. После быстрой термообработки жидкостным травлением на части пластин (образцы 3, 5, 10 и 12) удаляли защитный SiO_2 и проводили химическую очистку поверхности методом RCA. Затем для этой группы пластин 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 времяпролетной масс-спектрометрии вторичных ионов (TOF-SIMS) осуществлялись непосредственно на защитном оксиде.

На образце 7 проводилось наращивание термического подзатворного оксида кремния толщиной ~44 нм режимами, указанными выше. Он подвергался термическому отжигу в атмосфере азота с добавлением малого количества кислорода при температуре 1200 °C в течение 2 ч.

Т а б л и ц а 1. Операции обработки экспериментальных образцов

№ образца*	Удельное сопротивление, Ом·см	Толщина защитного оксида, нм	Доза имплантации N^+ , $см^{-2}$ ($E = 40$ кэВ)	Температура БТО, $^{\circ}C$ ($t = 15$ с)	Снятие защитного окисления	Толщина подзатворного оксида, нм	Температура отжига в атмосфере N_2 , $^{\circ}C$ ($t = 120$ 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.

Спектры НПВО структур SiO_2/Si зарегистрированы в диапазоне $400—4000\text{ см}^{-1}$ при комнатной температуре ИК-Фурье-спектрофотометром ALPHA (Bruker Optik GmbH, Германия) [8] с разрешением 2 см^{-1} , количеством сканов 24. Коррекция фона проводилась перед каждым измерением.

Профили распределения азота по глубине в структурах диэлектрик-кремний определялись методом TOF-SIMS системой TOF.SIMS 5 (IONTOF, Германия) с чувствительностью не хуже $5 \cdot 10^{15}—1 \cdot 10^{16}$ ат/см³. Травление образцов проводили пучком ионов Cs^+ с током 100 нА, ускоряемым напряжением 2 кэВ. Объемная концентрация примесей измерялась в импульсном режиме со временем цикла 50—100 мкс. В качестве первичных применялись ионы Bi^+ , ускоряемые напряжением 30 кэВ.

Результаты и их обсуждение. Спектры НПВО исследуемых структур SiO_2/Si существенно отличаются от спектров поглощения пластин монокристаллического кремния. Так, в спектрах НПВО структур SiO_2/Si (рис. 1) отсутствует 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, слабо выражена на фоне шумов. Для всех образцов зарегистрирована полоса при $\sim 510\text{ см}^{-1}$, обусловленная электронными переходами из основного состояния в возбужденное двухзарядных кремний-кислородных комплексов в нейтральном зарядовом состоянии [10]. Полосы с максимумами при 1007, ~ 1160 и 1240 см^{-1} (рис. 2, а) наблюдались ранее в спектрах пропускания слоев диоксида, полученных электронно-лучевым испарением [11] и термодеструкцией полиорганосилоксанов [12]. Полоса с максимумом при 1007 см^{-1} обусловлена валентными асимметричными 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].

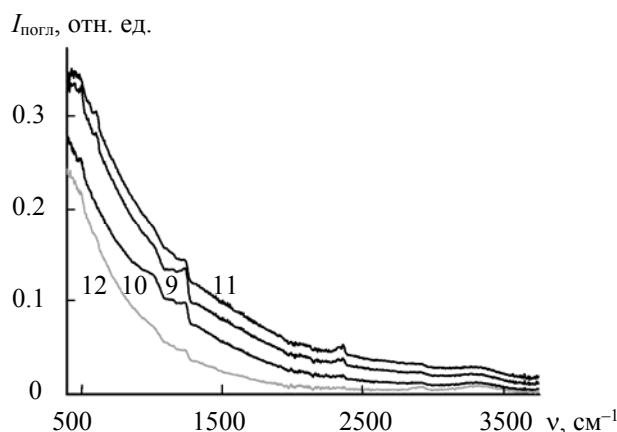


Рис. 1. Спектры НПВО образцов 9, 10, 11 и 12, имплантированных ионами N^+ ($D = 1 \cdot 10^{15}\text{ см}^{-2}$, $E = 40\text{ кэВ}$); 9 и 11 — образцы без удаления защитного оксида после ионной имплантации

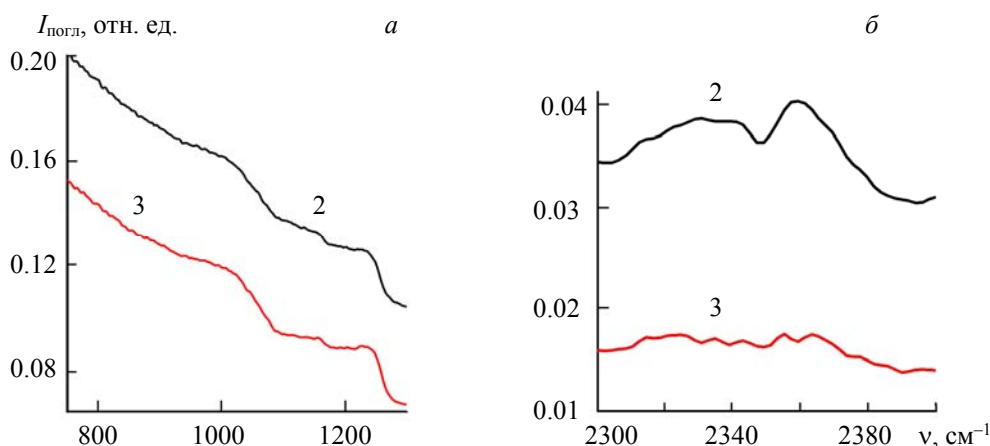


Рис. 2. Спектры НПВО образцов 2 и 3, имплантированных ионами N^+ ($D = 2.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, $E = 40 \text{ кэВ}$) в диапазонах $750\text{—}1250$ (а) и $2300\text{—}2400 \text{ см}^{-1}$ (б); 2 — образец без удаления защитного оксида после ионной имплантации; 3 — образец, на котором после имплантации ионами и быстрой термообработки удален защитный оксид

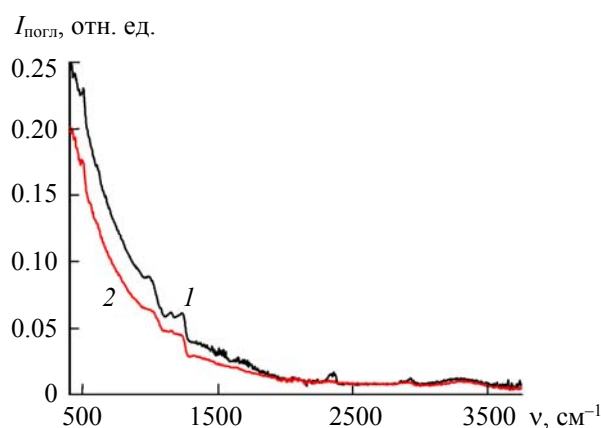


Рис. 3. Спектры НПВО образца 7, отожженного в атмосфере N_2 ($T = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$, $t = 120 \text{ мин}$): измерения с рабочей (1) и обратной (2) стороны пластины

Интенсивность полос при ~ 1160 и 1240 см^{-1} существенно варьирует от образца к образцу и практически не зависит от дозы имплантации N^+ и режима термообработки в атмосфере азота. Она выше в образцах 3 и 7, которые подвергались как имплантации ионами 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 $\sim 44 \text{ нм}$ (образец 3), так и термическому окислению для формирования подзатворного диэлектрика толщиной $\sim 44 \text{ нм}$ во влажном кислороде с последующей термообработкой при $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 120 мин в атмосфере азота (образец 7). Данные полосы 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 $<1500 \text{ см}^{-1}$ 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].

Полос поглощения в области $800\text{—}900 \text{ см}^{-1}$, регистрируемых ранее в спектре нитрида кремния [15] и обусловленных колебаниями связей Si-N , не обнаружено, что обусловлено их низкой интенсивностью относительно фонового поглощения.

В областях $2900\text{—}3000$ и $3250\text{—}3600\text{ см}^{-1}$ в спектрах НПВО структур SiO_2/Si , как имплантированных ионами азота, так и подвергавшихся термообработке в азотсодержащей атмосфере, наблюдаются низкоинтенсивные полосы, связанные с примесью водорода (рис. 4). Колебания в области $2900\text{—}3000\text{ см}^{-1}$ обычно связывают с поглощением С–Н-связями [16]. Широкая полоса низкой интенсивности в диапазоне $3250\text{—}3600\text{ см}^{-1}$ обусловлена валентными колебаниями О–Н. В спектрах НПВО она наблюдалась также в [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 имеются в спектрах практически всех образцов, однако провести детальный анализ вследствие их низкой интенсивности не представляется возможным.

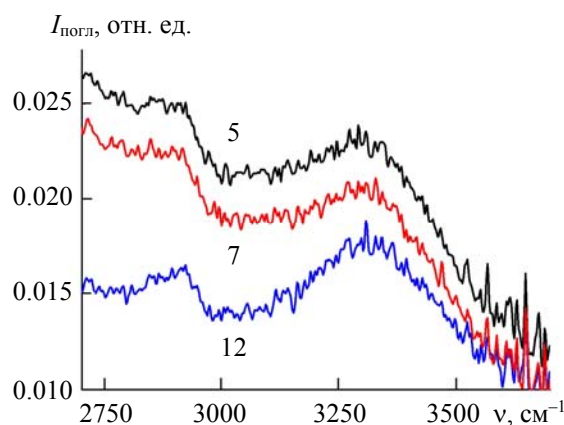


Рис. 4. Спектры НПВО образцов 5, 7 и 12 азотированных структур SiO_2/Si

В спектрах НПВО имплантированных структур SiO_2/Si наблюдается достаточно интенсивная полоса с максимумами при ~ 2320 и 2360 см^{-1} (рис. 1 и рис. 2, б), не характерная для монокристаллического кремния. Природа этой полосы до настоящего времени окончательно не установлена. Указанная полоса обнаружена в спектрах образцов, имплантированных азотом через защитный слой SiO_2 толщиной $\sim 23\text{ нм}$ (рис. 2, б, образец 2). Она отсутствует для всех образцов, которые подвергались снятию защитного оксида после проведения ионной имплантации N^+ и последующему окислению в атмосфере влажного кислорода (образец 3). Как видно из профилей распределения азота, определенных методом TOF-SIMS, при проведении БТО основная часть атомов азота диффундирует к границе раздела SiO_2/Si и накапливается в приграничной области оксида (рис. 5). При этом концентрация азота в защитном оксиде толщиной $\sim 23\text{ нм}$ для образцов 2 и 9 почти на два порядка выше, чем 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 удалена из образцов при снятии защитного диэлектрика, что не позволяет зарегистрировать указанные полосы в спектрах образцов, подвергшихся удалению защитного диоксида. Полоса с максимумами при ~ 2320 и 2360 см^{-1} наблюдалась также для подзатворного диэлектрика толщиной $\sim 44\text{ нм}$ после термообработки в атмосфере азота при 1200°C в течение 120 мин (рис. 3). В [18] 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 для монокристаллического кремния, легированного азотом в процессе выращивания из расплава по методу Чохральского [19].

Согласно расчетам с использованием программы SRIM (the Stopping and Range of Ions in Matter), проецированный пробег ионов при имплантации N^+ с энергией 40 кэВ составляет $\sim 110\text{ нм}$, что подтверждается экспериментальными результатами (рис. 5, образец 2). 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 на границе вследствие несовпадения периодов решеток [20].

В процессе постимплантационной быстрой термической обработки, как предположено в [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 напряжениями в кристаллической решетке.

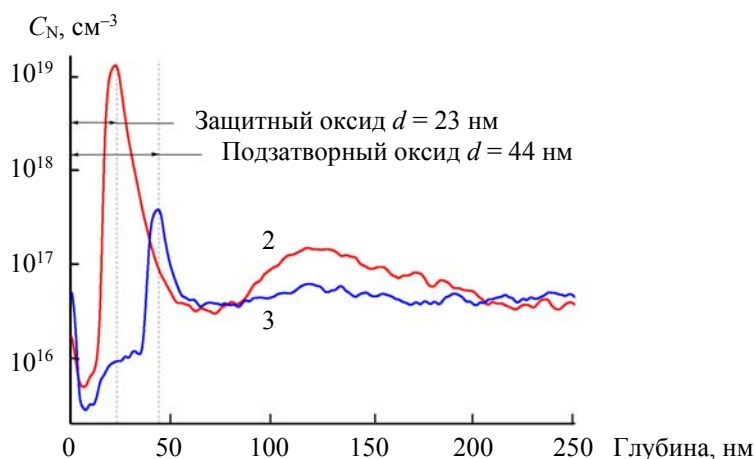
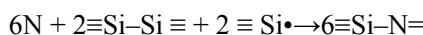


Рис. 5. Профили распределения атомов азота после имплантации ($D = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, $E = 40 \text{ кэВ}$) и быстрого термического отжига для образцов 2 и 3

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 и с P_b -дефектами (дефекты класса $\text{P}_b \equiv \text{Si}_3\text{Si} \cdot$ с одной нескомпенсированной ковалентной связью атома кремния [22]), в результате чего образуются Si–N-связи, при этом плотность поверхностных состояний на границе кремний-оксинитрид кремния уменьшается:



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

При постимплантационной быстрой термической обработке в защитном оксиде и подзатворном диэлектрике, подвергшемся термообработке в атмосфере азота при 1200°C в течение 120 мин, происходит локализация большей части атомов азота в области нестехиометрической части границы раздела Si/SiO_2 . Атомы азота, взаимодействуя с оборванными связями и заменяя нескомпенсированные или напряженные связи на более устойчивые, интегрируются на границе раздела, находя ниши в соответствии с атомным радиусом (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 атомы как кремния, так и кислорода и/или азота.

Заключение. Азотирование диэлектрика методом ионной имплантации с последующим постимплантационным быстрым термическим отжигом 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 максимумами при ~ 2320 и 2360 см^{-1} . Указанный спектральный диапазон характерен для колебаний двойных кумулятивных связей типа $\text{O}=\text{Si}=\text{N}-$. Формирование данных связей обусловлено взаимодействием азота с оборванными связями на границе раздела кремний-диэлектрик, вследствие чего нескомпенсированные или напряженные связи заменяются на более устойчивые.

- [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. Филиппеня, 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, F. J. Godoy.** Mat. Res. Soc. Symp. Proc., **396** (1996) 249—254
- [4] **L. S. Adam, C. Bowen, M. E. Law.** IEEE Transact. Electron Devices, **50**, N 3 (2003) 589—600
- [5] **Г. Я. Красников.** Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП транзисторов, Москва, Техносфера (2011)
- [6] **M. Milosevic.** Internal Reflection and ATR Spectroscopy, John Wiley & Sons (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.** Russ. Microelectronics, **50**, N 4 (2021) 239—245]
- [9] **Д. И. Бринкевич, В. В. Петров.** Журн. прикл. спектр., **46**, № 2 (1987) 305—307
- [10] **В. П. Маркевич, Л. И. Мурин, J. L. Lindström, M. Suezawa.** ФТП, **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. Намакшина, О. Д. Хорозова, В. В. Сахаров.** Успехи химии и хим. 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. Petlitskii, V. S. Prosolovich.** Russ. Microelectronics, **40**, N 4 (2011) 290—293]
- [14] **Ж. Панков.** Оптические процессы в полупроводниках, Москва, 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, Москва, МГУ (2012)
- [17] **Б. И. Селезнев, Д. Г. Федоров.** Вестн. Новгород. гос. ун-та, № 5 (103) (2017) 114—118
- [18] **M. 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. Филиппеня, Д. В. Шестовский.** Журн. Бел. гос. ун-та. Физика, № 3 (2020) 55—64
- [22] **В. А. Гриценко.** Успехи физ. наук, **179**, № 9 (2009) 921—930