Uzbek Journal of Physics

Vol.21(№5) 2019 PP.283-292

СТРУКТУРЫ КЛАСТЕРОВ $Si_nO_m^+$, РАСПЫЛЕННЫХ ИОННОЙ БОМБАРДИРОВКОЙ

С.Е. Максимов[1,2], Х.Б. Ашуров[1], М.М. Адилов[1], С.Ф. Коваленко[1], О.Ф. Тукфатуллин[1], Ш.Т. Хожиев[1]

[1]Институт ионно-плазменных и лазерных технологий им.У.А.Арифова АН РУз, Ташкент, Узбекистан, maksimov_s@yahoo.com

[2]Институт химии и физики полимеров АН РУз, Ташкент, Узбекистан

(Получена 10.05.2019)

$Si_nO_m^+$ кластерлар тескари геометрияли, иккиламчи фокусировкали ионли микроанализатор ёрдамида Si сиртидан Xe^+ билан бомбардимон қилиш ва камерага кислородни ҳайдаш йули билан ўрганилган. Кластерли катионлар учун тузилиш схемаси таклиф этилган, ҳамда унинг ва нейтраллар ва анион кластерлар учун олинган натижалар билан мутаносиблиги аниқланган.

С использованием ионного микроанализатора с двойной фокусировкой обратной геометрии исследованы кластеры $Si_nO_m^+$, распыленные с поверхности Si ионами Xe^+ при напуске кислорода на поверхность. Представлены предполагаемые структурные схемы кластерных катионов, проведено сравнение со структурами нейтралей и анионных кластеров оксида кремния.

$Si_nO_m^+$ cluster ions sputtered from Si surface by Xe^+ under O_2 flooding have been investigated using double focusing ion microanalyzer with reverse geometry. Proposed structural schemes of the cluster cations have been presented, the comparison has been made with the structures of neutrals and anion clusters of silicon oxide.

I. ВВЕДЕНИЕ

Оксид кремния играет важную роль в полупроводниковой технологии, катализе, химии поверхности. Физические свойства слоёв и структур SiO_2 сильно зависят от их размеров. Так, в микронной области значительный интерес представляют т.н. частицы Штёбера [1] – монодисперсные сферические частицы диоксида кремния с размерами, охватывающими практически весь коллоидный спектр. Эти частицы находят всё большее применение в различных областях техники, в том числе в информационных и коммуникационных технологиях, в медицине и биологии, в мониторинге окружающей среды [2-4], а также в лазерных технологиях [5-7]. Сферические частицы SiO_2 с плотно упакованной структурой (фотонные кристаллы) используются в качестве пассивных оптических устройств, таких как фильтры, зеркала, переключатели и суперпризмы [8].

Среди структур оксида кремния особое место занимает гранулированный кремний, который представляет собой зёрна кремния с различным линейным размером и естественным окисным слоем SiO_2 на их поверхности. Особый интерес обусловлен описанным в [9, 10] тепловольтаическим эффектом, заключающимся в генерации ЭДС в изотипном, однородно нагретом преобразователе тепловой энергии (ПТЭ) из микрозернистого кремния. При этом величина данной ЭДС в десятки раз превышала таковую, которая могла бы возникнуть, если допустить наличие в теле ПТЭ неконтролируемого в эксперименте градиента температуры. В

работах [11-15] описаны проявления этого эффекта; показано, что он может быть объяснён процессами переноса носителей через наномасштабные оксидные межзёренные слои.

Известно, что когда количество частиц вещества уменьшается до нескольких сотен атомов и менее, его свойства радикально изменяются по сравнению с объёмными материалами [16], поэтому в последние годы поискам методов генерации и исследованиям фундаментальных свойств наночастиц и кластеров оксида кремния уделяется значительное внимание. Вторично-ионная масс-спектрометрия (ВИМС) имеет ряд преимуществ перед другими методами получения кластеров и исследования их свойств, поскольку, во-первых, позволяет путём подбора распыляемого материала и сорта бомбардирующих ионов генерировать не только гомо-, но и гетероядерные кластеры, которые трудно или вообще невозможно синтезировать другими методами. Во-вторых, высокая доля заряженных и возбуждённых кластеров обеспечивает значительное удобство для проведения исследований.

Целью настоящей работы является использование возможностей метода ВИМС для генерации и изучения положительно заряженных кластеров оксида кремния с различным числом атомов кремния и кислорода и оценка возможных структур таких кластеров на основе сравнения полученных результатов с литературными данными.

II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ПРИБОР И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования эмиссии и фрагментации распыленных кластеров $Si_nO_m^+$ проводили на вторично-ионном масс-спектрометре с двойной фокусировкой обратной геометрии [17] (рис. 1) по методике [18-21]. Кластеры генерировали бомбардировкой мишеней Si ионами Xe^+ с энергией 8.5 кэВ под углом 45° при напуске O_2 в рабочую камеру до давления 5×10^{-3} Па и сканировании поверхности в растр 1.5×1.5 мм. Ионные токи составляли 0.4–0.5 мкА при плотности тока $\sim10^{-4}$ А·см$^{-2}$. Ускоренные до энергии eU_0 = 5000 эВ вторичные ионы поступали на вход масс-спектрометра в режиме динамического согласования [17]. Давление в бесполевых зонах движения вторичных ионов составляло $\sim10^{-6}$ Па. В качестве объектов исследования были выбраны положительные кластеры $Si_nO_m^+$, поскольку согласно [18] в спектре масс-отрицательных кластеров оксида кремния преобладают в основном структуры вида $Si_nO^-_{2n}$ и $Si_nO^-_{2+1}$, тогда как распыленные положительные ионы имеют различное число атомов кремния и кислорода в своём составе [19-21].

В приборе (рис. 1) имеются две бесполевые зоны, в которых возможна прямая регистрация распадов вторичных ионов, протекающих в различных временных диапазонах после эмиссии: зона S_1 – пространство между краем иммерсионного обьектива и торцом магнитного анализатора (время пролета зоны $\sim10^{-6}$–10^{-5} с), и зона S_2 между выходной границей поля масс-анализатора и входной границей поля энергоанализатора (время пролета зоны $\sim10^{-5}$–10^{-4} с). Если реакция распада распыленного кластера

$$M_n^{\pm}\rightarrow M_{n-k}^{\pm}+M_k, \qquad (1)$$

где $M_n^{\pm}$ – масса материнского иона и $M_{n-k}^{\pm}$ – масса заряженного осколка, то кинетическая энергия образующегося во второй бесполевой зоне S_2 осколка равна

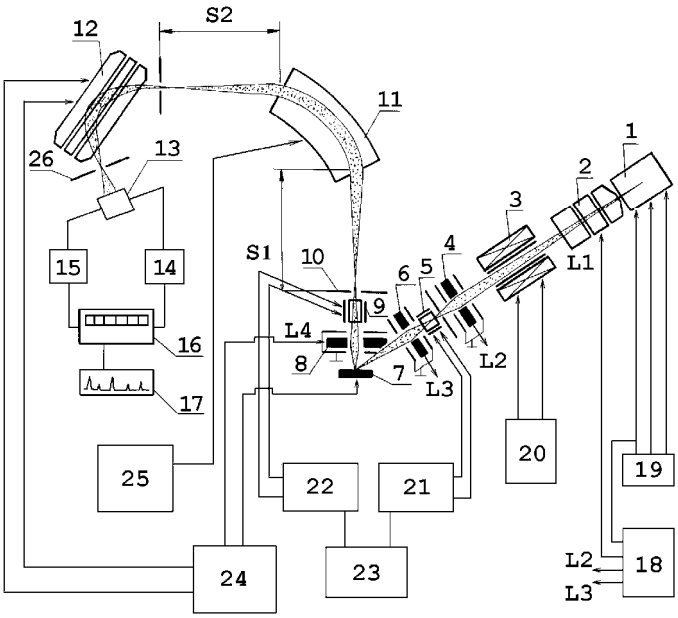


Рис. 1. Масс-спектрометр с двойной фокусировкой обратной геометрии [17]: 1 – ионный источник; 2, 4, 6 – линзы фокусировки первичного пучка; 3 – фильтр Вина; 5 – система сканирования первичного пучка; 7 – образец; 8 – линза фокусировки вторичного пучка; 9 – система отклонения вторичного пучка; 10, 26 – диафрагмы; 11 – магнитный анализатор; 12 – энергоанализатор; 13 – переключатель УПТ-ВЭУ; 14-17 – система регистрации; 18-25 – блоки управления; S_1 и S_2 – бесполевые зоны масс-анализатора.

$$E_{fr} = \left(M_{n-k}^{\pm} / M_n^{\pm}\right) eU_0 , \tag{2}$$

где U_0 – напряжение ускорения, приложенное к образцу. Осколочные ионы, образовавшиеся в результате реакции (1) в первой бесполевой зоне S_1, можно зарегистрировать настройкой масс-анализатора на пропускание ионов с кажущейся массой $M^* = \left(M_{n-k}^{\pm}\right)^2 / M_n^{\pm}$ при одновременной настройке энергоанализатора на полосу пропускания осколочных ионов с энергией E_{fr}, определяемой соотношением (2). Абсолютное разрешение прибора по энергии изменяли регулировкой ширины промежуточной и выходной щелей масс-спектрометра, так что во всех исследованиях для осколочных ионов оно соответствовало величине 2±0.5 эВ.

III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование распыленных $Si_nO_m^+$ кластеров показывает, что их масс-спектр в описанных выше экспериментальных условиях соответствует в основном представленному ранее в [19, 21]. На рис. 2 приведена соответствующая диаграмма [19] распределения интенсивностей выходов положительно заряженных кластеров $Si_nO_m^+$, распыленных ионами Xe^+ при напуске кислорода. Диаграмма сгруппирована в соответствии с числом атомов кремния n (n – номер кластерной серии, m – число атомов O в кластере). Полученные результаты свидетельствуют, что в этом случае наблюдается интенсивная эмиссия $Si_nO_m^+$ кластеров с различным

числом атомов кремния и кислорода в своём составе. В целом, для $Si_nO_m^+$ характерно уменьшение интенсивностей выходов с увеличением чисел n и m, и для положительных ионов, в отличие от отрицательных [18], практически отсутствуют какие-либо кластеры, явно выделенные по своей относительной интенсивности.

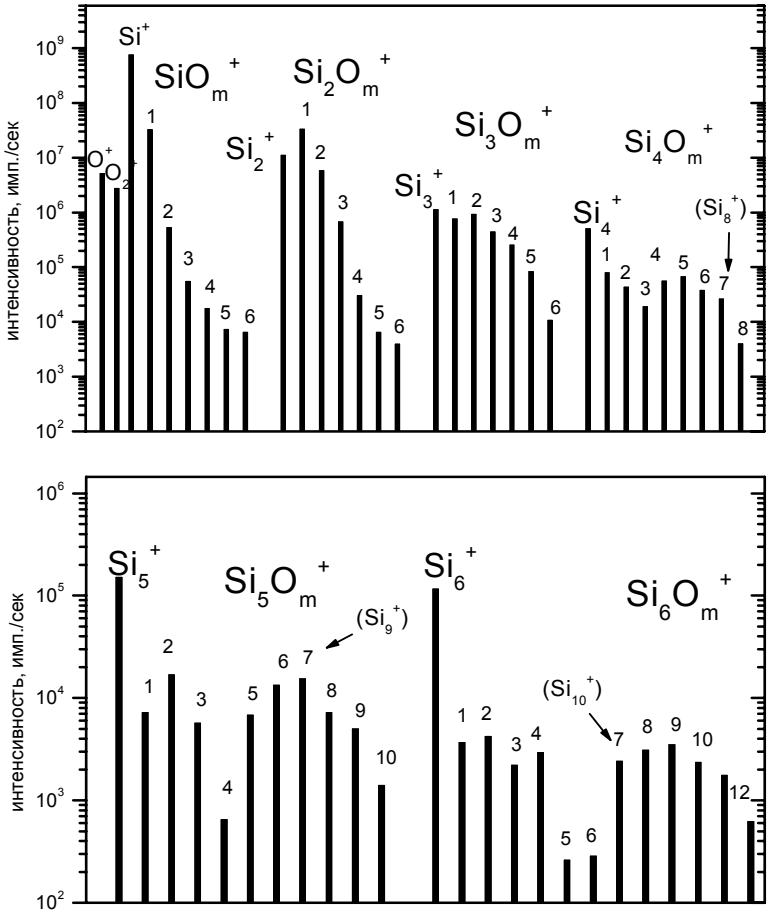


Рис. 2. Диаграммы выходов положительных кластерных ионов $Si_nO_m^+$, полученных при распылении поверхности кремния ионами Xe^+ с энергией 8.5 кэВ при напуске кислорода [19].

Выводы о возможной структуре распыленных кластеров могут быть сделаны на основе изучения их каналов распада и определения их энергий диссоциации. Фрагментационные каналы $Si_nO_m^+$ с n=1–3 были исследованы нами ранее в [19]. В табл. 1 представлены основные (по три наиболее интенсивных) распады кластеров $Si_nO_m^+$ с n=4–5. Как и для $Si_nO_m^+$ с числом n=1–3, для большинства этих кластеров (кроме $Si_5O_5^+$) преобладающим является канал с выбросом нейтрального SiO, но в целом у катионов оксида кремния отсутствуют какие-либо явно выделяющиеся направления распадов. Сравнивая полученные результаты с данными работы [22], в которой структуры и направления фрагментации нейтральных кластеров Si_nO_m изучали компьютерным моделированием с использованием метода теории функционала плотности (density functional theory, DFT), необходимо отметить, что

все каналы фрагментации нейтралей, найденные в [22], наблюдаются нами экспериментально у положительных $Si_nO_m^+$, имеющих то же самое число атомов кремния и кислорода в своём составе. В целом, однако, и полученные в [19], и представленные в табл. 1 результаты исследований направлений и вероятностей распадов положительных ионов $Si_nO_m^+$ указывают на наличие большего количества каналов фрагментации по сравнению с распадами нейтральных Si_nO_m [22] той же стехиометрии. В то же время значительное подобие каналов фрагментации положительно заряженных $Si_nO_m^+$, представленных в [19] и в табл. 1, и направлений распадов нейтралей Si_nO_m, имеющих то же самое число атомов кремния и кислорода в своём составе, позволяет высказать предположение о подобии их структур.

Таблица 1. Основные каналы распада и вероятности P(%) фрагментации кластеров $Si_nO_m^+$ с n=4**,** 5, распыленных с поверхности Si ионами Xe^+ при напуске O_2.

Ион	Канал распада	Заряженный фрагмент	Нейтральный фрагмент	Зона S_2, P (%)	Зона S_1, P (%)
Si_4O^+	$Si_3^+ + SiO$	Si_3^+	SiO	7.7×10^{-2}	6.2×10^{-1}
	$Si_2O^+ + Si_2$	Si_2O^+	Si_2	1.4×10^{-2}	6.1×10^{-2}
	$Si_3O^+ + Si$	Si_3O^+	Si	3.4×10^{-1}	1.5
$Si_4O_2^+$	$Si_2O^+ + Si_2O$	Si_2O^+	Si_2O	1.6×10^{-2}	1.1×10^{-1}
	$Si_3O^+ + SiO$	Si_3O^+	SiO	3.7×10^{-1}	2.8
	$Si_3O_2^+ + Si$	$Si_3O_2^+$	Si	5.5×10^{-2}	9.2×10^{-2}
$Si_4O_3^+$	$Si_2O^+ + Si_2O_2$	Si_2O^+	Si_2O_2	3.5×10^{-2}	2.0×10^{-1}
	$Si_3O_2^+ + SiO$	$Si_3O_2^+$	SiO	7.0×10^{-1}	5.3
	$Si_3O_3^+ + Si$	$Si_3O_3^+$	Si	1.4×10^{-2}	4.0×10^{-2}
$Si_4O_4^+$	$Si_3O_3^+ + SiO$	$Si_3O_3^+$	SiO	6.8×10^{-1}	4.4
	$Si_2O_2^+ + Si_2O_2$	$Si_2O_2^+$	Si_2O_2	2.2×10^{-3}	2.1×10^{-2}
	$SiO^+ + Si_3O_3$	SiO^+	Si_3O_3	1.7×10^{-3}	1.1×10^{-2}
$Si_4O_5^+$	$Si_3O_3^+ + SiO_2$	$Si_3O_3^+$	SiO_2	3.5×10^{-3}	2.1×10^{-2}
	$Si_3O_4^+ + SiO$	$Si_3O_4^+$	SiO	5.6×10^{-1}	4.0
	$Si_4O_3^+ + O_2$	$Si_4O_3^+$	O_2	1.2×10^{-1}	1.6×10^{-3}
$Si_4O_6^+$	$Si_3O_4^+ + SiO_2$	$Si_3O_4^+$	SiO_2	3.6×10^{-2}	2.5×10^{-1}
	$Si_3O_5^+ + SiO$	$Si_3O_5^+$	SiO	6.1×10^{-1}	3.5
	$Si_4O_5^+ + O$	$Si_4O_5^+$	O	2.1×10^{-2}	1.7×10^{-1}
Si_5O^+	$Si_4^+ + SiO$	Si_4^+	SiO	1.7×10^{-1}	2.1
	$Si_2O^+ + Si_3$	Si_2O^+	Si_3	2.1×10^{-2}	1.3×10^{-1}
	$Si_4O^+ + Si$	Si_4O^+	Si	1.3×10^{-1}	2.2×10^{-2}
$Si_5O_2^+$	$Si_3O^+ + Si_2O$	Si_3O^+	Si_2O	1.8×10^{-2}	9.0×10^{-2}
	$Si_4O^+ + SiO$	Si_4O^+	SiO	4.2×10^{-1}	2.4
	$Si_4O_2^+ + Si$	$Si_4O_2^+$	Si	1.1×10^{-2}	2.1×10^{-2}
$Si_5O_3^+$	$Si_3O_2^+ + Si_2O$	$Si_3O_2^+$	Si_2O	8.2×10^{-2}	2.2
	$Si_4O_2^+ + SiO$	$Si_4O_2^+$	SiO	5.6×10^{-1}	2.4
	$Si_4O_3^+ + Si$	$Si_4O_3^+$	Si	1.1	5.6
$Si_5O_5^+$	$Si_3O_3^+ + Si_2O_2$	$Si_3O_3^+$	Si_2O_2	2.4×10^{-2}	1.2×10^{-1}
	$Si_4O^+ + SiO_4$	Si_4O^+	SiO_4	3.9×10^{-2}	5.3×10^{-2}
	$Si_4O_5^+ + Si$	$Si_4O_5^+$	Si	4.7×10^{-2}	4.7×10^{-2}
$Si_5O_6^+$	$Si_4O_5^+ + SiO$	$Si_4O_5^+$	SiO	9.9×10^{-1}	6.4
	$Si_5O_3^+ + O_3$	$Si_5O_3^+$	O_3	4.0×10^{-2}	4.0×10^{-2}
	$Si_5O_4^+ + O_2$	$Si_5O_4^+$	O_2	6.9×10^{-1}	3.1×10^{-3}

Для определения возможных структур распыленных кластерных ионов чрезвычайно важно знать численные значения их энергии активации распада (диссоциации). В работе [20] нами были получены энергии диссоциации ряда кластеров $Si_nO_m^+$ (n=2–5, m=2–7) по методике, основанной на измерении спектров кинетических энергий осколочных ионов при фрагментации кластеров во второй бесполевой зоне S_2 прибора (рис. 1). Для расчёта на основе этих измерений энергий диссоциации $Si_nO_m^+$ в [20] была использована методика на базе теории мономолекулярных реакций Райса-Рамспергера-Касселя (РРК) [23], а также описанная, в частности в [24], методика с использованием модели «испарительного ансамбля» [25, 26]. Полученные в [20] результаты приведены в табл. 2. К сожалению, относительно малые интенсивности сигналов фрагментных ионов при распадах кластеров $Si_nO_m^+$ больших размеров не позволяют провести для них аналогичные измерения спектров кинетических энергий осколочных ионов. Данные табл. 2 свидетельствуют, однако, о том, что энергии диссоциации положительных кластеров $Si_nO_m^+$ близки к энергиям связи на отрыв по соответствующим фрагментационным каналам нейтральных кластеров Si_nO_m [22]. С учётом найденных значений энергий диссоциации и значительного подобия каналов фрагментации положительных кластеров $Si_nO_m^+$ и нейтралей Si_nO_m можно сделать вывод о близости структуры и свойств положительных $Si_nO_m^+$ и нейтральных кластеров Si_nO_m одинакового состава. Следует отметить также, что аналогичный вывод о качественном подобии структур катионов и нейтральных кластеров оксида кремния одинакового состава был сделан авторами [27] при изучении кластерных ионов $Si_nO_m^+$, полученных методом лазерной абляции, и расчёте структур и характеристик $Si_nO_m^+$ и Si_nO_m методом DFT.

Таблица 2. Энергии диссоциации (E_d) положительных кластеров $Si_nO_m^+$ [20] и нейтральных (E_b) кластеров Si_nO_m [22]: KL – модель “испарительного ансамбля”; RRK – теория мономолекулярных реакций.

Катион	Канал распада	E_d, эВ		Нейтр. класт.	Канал распада	E_b, эВ [22]
		(KL)	(RRK)			
$Si_2O_3^+$	$Si_2O_3^+ \rightarrow SiO^+ + SiO_2$	2.26	3.20	Si_2O_3	$Si_2O_3 \rightarrow SiO + SiO_2$	3.34
$Si_3O_2^+$	$Si_3O_2^+ \rightarrow Si_2O^+ + SiO$	0.75	1.06	Si_3O_2	$Si_3O_2 \rightarrow Si_2O + SiO$	1.68
$Si_3O_3^+$	$Si_3O_3^+ \rightarrow Si_2O_2^+ + SiO$	1.21	1.30	Si_3O_3	$Si_3O_3 \rightarrow Si_2O_2 + SiO$	2.38
$Si_3O_4^+$	$Si_3O_4^+ \rightarrow Si_2O_2^+ + SiO_2$	3.19	3.09	Si_3O_4	$Si_3O_4 \rightarrow Si_2O_3 + SiO$	3.43
$Si_4O_3^+$	$Si_4O_3^+ \rightarrow Si_3O_2^+ + SiO$	1.14	1.10	Si_4O_3	$Si_4O_3 \rightarrow Si_3O_2 + SiO$	2.11
$Si_4O_4^+$	$Si_4O_4^+ \rightarrow Si_3O_3^+ + SiO$	1.82	1.65	Si_4O_4	$Si_4O_4 \rightarrow Si_3O_3 + SiO$	1.61
$Si_4O_5^+$	$Si_4O_5^+ \rightarrow Si_3O_4^+ + SiO$	2.91	2.54	Si_4O_5	$Si_4O_5 \rightarrow Si_3O_4 + SiO$	2.51
$Si_4O_6^+$	$Si_4O_6^+ \rightarrow Si_3O_5^+ + SiO$	3.72	3.18	Si_4O_6	$Si_4O_6 \rightarrow Si_3O_5 + SiO$	3.49
$Si_5O_2^+$	$Si_5O_2^+ \rightarrow Si_4O^+ + SiO$	3.0	2.89	Si_5O_2	$Si_5O_2 \rightarrow Si_4O + SiO$	2.87
$Si_5O_6^+$	$Si_5O_6^+ \rightarrow Si_4O_5^+ + SiO$	2.95	2.49	Si_5O_6	$Si_5O_6 \rightarrow Si_4O_5 + SiO$	2.48
$Si_5O_7^+$	$Si_5O_7^+ \rightarrow Si_4O_6^+ + SiO$	3.70	3.09	Si_5O_7	$Si_5O_7 \rightarrow Si_4O_6 + SiO$	2.80

Совокупность полученных результатов позволяет высказать предположения о возможной структуре кластерных ионов $Si_nO_m^+$: наиболее вероятными для них являются структуры (рис. 3), аналогичные рассчитанным в [22] нейтральным Si_nO_m в основном состоянии. Отдельным вопросом в этом случае является локализация положительного заряда. Согласно [27], избыток положительного заряда, созданный

удалением одного электрона, распределяется между атомами Si и вызывает напряжение кластерной структуры; энергия катиона при этом стабилизируется изменением длины Si-Si или Si-O связей или их разрывом.

Предложенные нами наиболее вероятные структурные формы положительных $Si_nO_m^+$ (рис. 3) отличаются от структур отрицательных кластеров $Si_nO_m^-$ [18]. Так, сопоставление реакций распада кластерных ионов $Si_nO_m^-$ и нейтральных кластеров [22] свидетельствует о том, что основные фрагментационные каналы $Si_nO_m^-$, в основном, совпадают с каналами распада нейтралей, имеющих в своём составе на один атом кислорода меньше. Это позволило нам [18] высказать предположение о том, что распыленные отрицательные оксидные кластеры $Si_nO_m^-$ могут быть представлены как комплексный ион с нейтральным ядром вида Si_nO_{m-1} и присоединенным к нему отрицательным кислородом O^-, причём отрицательный кислород, присоединенный к Si_nO_{m-1}, не влияет на свойства кластерного иона. Иначе говоря, нейтральным кластерам Si_nO_{m-1} может быть поставлен в соответствие, согласно [18], отрицательный кластерный ион $Si_nO_m^-$, имеющий ту же структуру и свойства в основном состоянии, но с одним дополнительным атомом кислорода, несущим отрицательный заряд. При этом колебательная энергия возбуждения распыленного комплексного иона и выделение энергии возбуждения на конкретной связи, приводящее в конечном счете к разрыву связей с выбросом из комплекса нейтрального фрагмента, не зависят от O^-. Вместе с тем найденные [18] энергии диссоциации E_d, по крайней мере, наиболее интенсивных, в масс-спектрах «магических» кластеров $Si_nO^-_{2n+1}$ как по абсолютной величине, так и в зависимости от размера кластера n=2–7 очень хорошо совпадают со значениями энергии связи наиболее стабильных кластеров $(SiO_2)_n$, вычисленными МД моделированием в [28].

В то же время вычисления [22] не показывают для этих кластеров заметного прироста энергий связи при увеличении их размера n, т.е. слабо коррелируют как с данными измерений [18], так и с результатами [28].

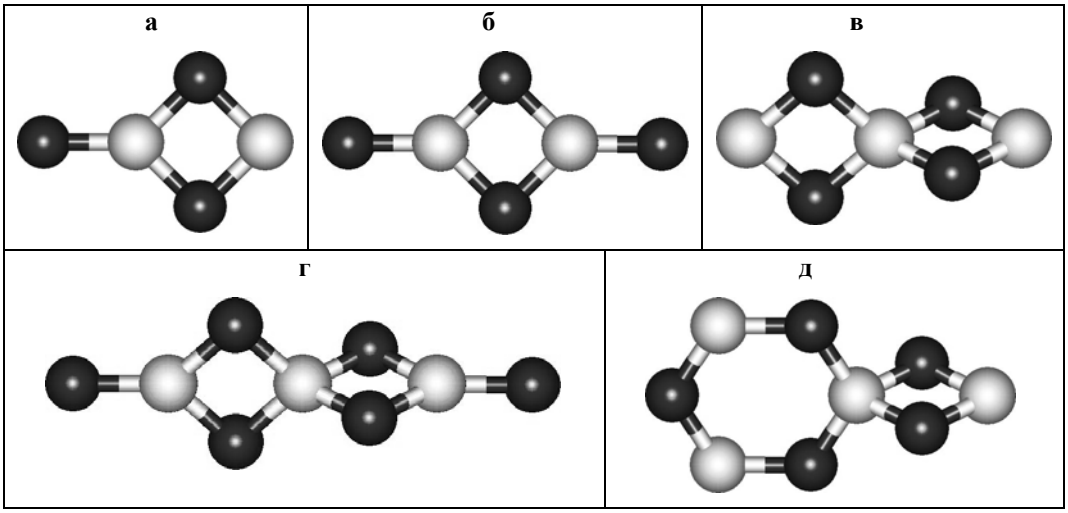


Рис. 3. Вероятные структурные схемы некоторых распыленных кластерных катионов $Si_nO_m^+$ на основе структур соответствующих нейтральных кластеров Si_nO_m [22] в основном состоянии (серый цвет – атомы Si, черный – атомы O): $Si_2O_3^+$ (а); $Si_2O_4^+$ (б); $Si_3O_4^+$ (в); $Si_3O_6^+$ (г); $Si_4O_5^+$ (д).

Хотя каналы распадов распыленных кластерных ионов $Si_nO_m^-$ [18] подобны фрагментационным каналам соответствующих нейтралей Si_nO_{m-1} [22], для отрицательных кластеров $(Si_nO_{2n+1})^-$ более предпочтительными представляются структуры [18] (рис. 4), полученные на основе [28] с добавлением O^-. Для положительно заряженных $Si_nO_m^+$ кластеров, как указывалось выше, более вероятными представляются структуры, аналогичные описанным в [22] структурам соответствующих нейтральных Si_nO_m с наименьшей энергией.

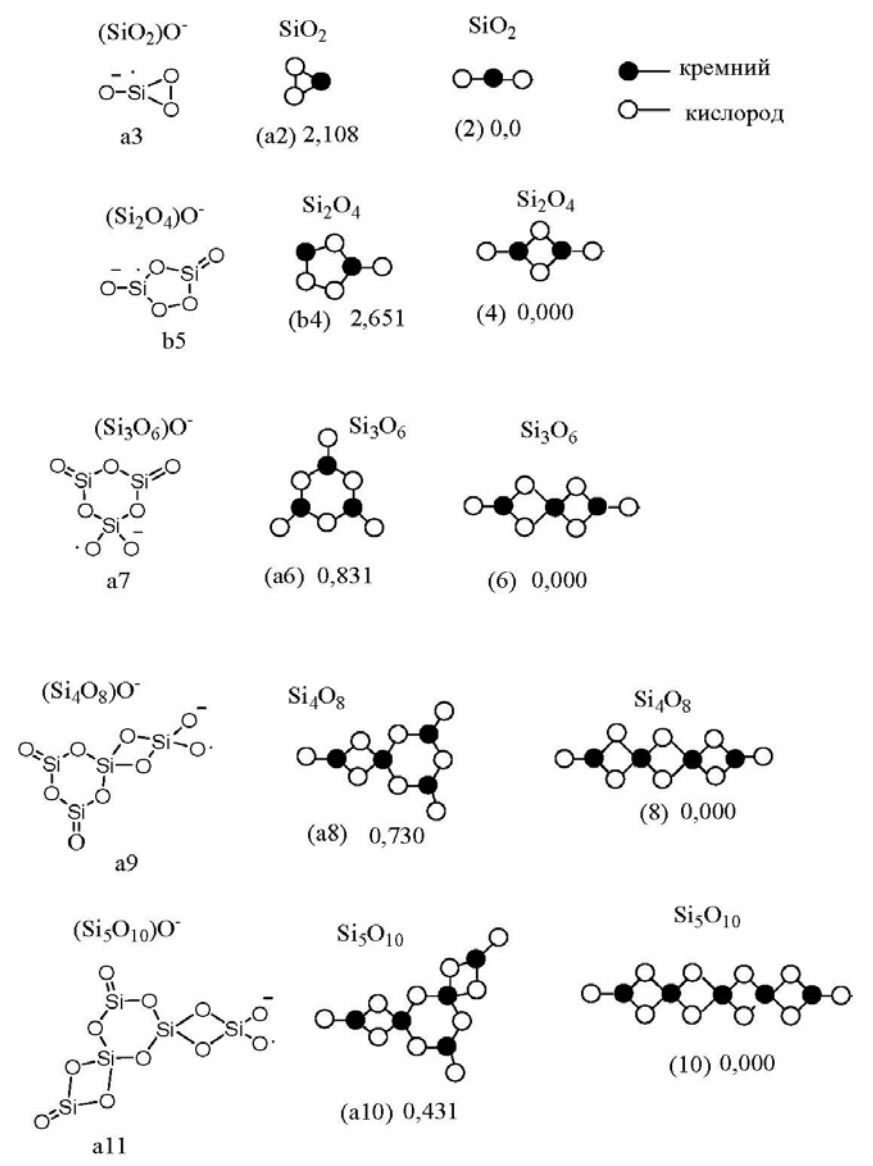


Рис. 4. Вероятные структурные схемы [18] распыленных “магических" кластерных анионов $(SiO_2)_nO^-$ *(n*=1–5) и теоретически рассчитанных нейтралей $(SiO_2)_n$ [22, 28] с относительными энергиями в эВ по [22].

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования методом ВИМС положительно заряженных кластеров $Si_nO_m^+$, синтезированных при ионном распылении поверхности, позволяют определить их основные фрагментационные каналы и найти их энергии диссоциации. Сравнение полученных результатов с литературными данными теоретических расчётов кластеров оксида кремния позволяет высказать предположение, что структуры распыленных катионов $Si_nO_m^+$, по-видимому, совпадают со структурами аналогичных нейтралей Si_nO_m в основном состоянии. В то же время возможные структуры $Si_nO_m^+$ отличаются от наиболее вероятных структур анионов $Si_nO_m^-$, для которых характерны изомеры, соответствующие нейтральным Si_nO_m в состояниях с большими значениями потенциальной энергии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства инновационного развития Республики Узбекистан (контракт №ОТ-Ф3-11).

ЛИТЕРАТУРА

1. W. Stöber, A. Fink, E. Bohn, Colloid Interface Sci. **26**, 62 (1968).
2. B.D. Karmaker, G. De, D. Ganguli, J. Non-Cryst. Solids **272**, 119 (2000); https://doi.org/10.1016/S0022-3093(00)00231-3
3. F. Volmer, D. Braun, A. Libchaber, M. Khoshsima, I. Teraoka, S. Arnold, Appl. Phys. Lett. **80,** 4057 (2002); https://doi.org/10.1063/1.1482797
4. I.M. White, N.M. Hanumegowda, X. Fan, Opt. Lett. **30,** 3189 (2005); https://doi.org/10.1364/OL.30.003189
5. K.J. Vahala, Nature **424,** 839 (2003); https://doi.org/10.1038/nature01939
6. S.M. Spillane, T.J. Kippenberg, K.J. Vahala, Nature **415,** 621 (2002); https://doi.org/10.1038/415621a
7. V. Cai, O. Painter, K.J. Vahala, P.C. Sercel, Opt. Lett. **25,** 1430 (2000); https://doi.org/10.1364/OL.25.001430
8. R. Fenollosa, M. Ibisate, S. Rubio, C. Lopez, J. Sanchez-Dehesa, J. Appl. Phys. **93,** 671; (2003). DOI: 10.1063/1.1525399
9. М.Х. Ашуров, Б.М. Абдурахманов, М.М. Адилов, Х.Б. Ашуров, Докл. АН РУз № 3**,** 45 (2010).
10. Б.М. Абдурахманов, Б.Л. Оксенгендлер, Докл. АН РУз № 1**,** 26 (2011).
11. B.M. Abdurakhmanov, M.M. Adilov, M.Kh. Ashurov, Kh.B. Ashurov, S.E. Maksimov, B.L. Oksengendler, Appl. Sol. Energy **48** (2), 79 (2012); DOI:10.3103/S0003701X12020028
12. B.L. Oksengendler, Kh.B. Ashurov, B.M. Abdurakhmanov, S.E. Maksimov, Appl. Sol. Energy **49(2)**, 70 (2013); https://doi.org/10.3103/S0003701X13020102
13. B.M. Abdurakhmanov, M.M. Adilov, M.Kh. Ashurov, Kh.B. Ashurov, Sh.K. Kuchkanov, S.E. Maksimov, B.L. Oksengendler, Appl. Sol. Energy **51** (4), 253 (2015); https://doi.org/10.3103/S0003701X15040039
14. Б.М. Абдурахманов, М.Х. Ашуров, Х.Б. Ашуров, Ш.К. Кучканов, С.Е. Максимов, С.Ж. Ниматов, Узбек. физич. журн. **16**, № 3, 219 (2014).
15. М.Х. Ашуров, Б.М. Абдурахманов, Х.Б. Ашуров, С.Е. Максимов, Б.Л. Оксенгендлер, Докл. АН РУз № 4, 16 (2015).
16. И.П. Суздалев. Физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов (Москва, Ком. Книга, 2006).
17. A.D. Bekkerman, N.Kh. Dzhemilev, V.M. Rotstein, Surf. and Interf. Anal. **15**, 587 (1990).
18. Н.Х. Джемилев, Л.Ф. Лифанова, С.Е. Максимов, О.Ф. Тукфатуллин, Ш.Т. Хожиев, Узбек. физич. журн. **9** № 5-6, 325 (2007).

19. С.Е. Максимов, Н.Х. Джемилев, Л.Ф. Лифанова, О.Ф. Тукфатуллин, Ш.Т. Хожиев, Поверхность **5,** 54 (2008).
20. N.Kh. Dzhemilev, S.F. Kovalenko, L.F. Lifanova, S.E. Maksimov, Sh.T. Khojiev, Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics **72**, № 7, 910 (2008); DOI:10.3103/S1062873808070095
21. N.Kh. Dzhemilev, S.F. Kovalenko, S.E. Maksimov, O.F. Tukfatullin, Sh.T. Khojiev, Journal of Surface Investigation **11**(3), 490 (2017); DOI: 10.1134/S1027451017010074
22. W.C. Lu, C.Z. Wang, V. Nguen, M.W. Gordon, K.M. Ho, J. Phys. Chem. A **107**, 6936 (2003); doi:10.1021/jp027860h.
23. П. Робинсон, К. Холбрук. Мономолекулярные реакции (Москва, Мир, 1975).
24. С.Е. Максимов, С.В. Верхотуров, В.В. Соломко, Узбек. физич. журн. **6** № 2, 96 (2004).
25. C.E. Klots, Z. Phys. D **5**, 83 (1987).
26. C. E.Klots, Z. Phys. D **21**, 335 (1991).
27. M. Jadraque, M. Santos, L. Díaz, J. Alvarez-Ruiz, M. Martín, J. Phys. Chem. A **113** (41), 10880 (2009); doi: 10.1021/jp906084p
28. J.A. Harkless, D.K. Stillinger, F.H. Stillinger, J. Phys. Chem. **100**, 1098 (1996).