Спектроскопия полного тока окисленного кремния

У.Б. Шаропов[*1,2]

[1]Физико-технический институт НПО «Физика–Солнце» АН РУз, ул. Чингиз Айтматов, 2, 100084, Ташкент, Узбекистан
[2]Институт материаловедения АН РУз, ул. Чингиз Айтматов, 2, 100084, Ташкент, Узбекистан

Получена 24.11.2021.

* Corresponding author: e-mail utkirstar@gmail.com, Phone: +988 90 115 9779

В настоящей работе рассмотрены экспериментальные данные окисления поверхности кремния в вакууме при последующем отжиге, полученные методом спектроскопии полного тока. Проведенные исследования показали, что при использовании температурного отжига для очистки поверхности кремния от загрязнений есть свои плюсы и минусы. Нельзя допустить длительный отжиг при высоких температурах, который приводит к окислению кремния. А использование кратковременной вспышки можно использовать только для удаления физически (не химически) адсорбированного слоя атомов.

Ключевые слова: спектроскопия полного тока, кремний, отжиг, поверхность.

In this work, we consider the experimental data on the oxidation of the silicon surface in vacuum with subsequent annealing obtained by total current spectroscopy. Studies have shown that when using temperature annealing to clean the silicon surface from contamination, there are pluses and minuses. Prolonged annealing at high temperatures, which leads to silicon oxidation, must not be allowed. And the use of a short time flash can only be used to remove a physically (not chemically) adsorbed layer of atoms.

Keywords: total current spectroscopy, silicon, annealing, surface.

DOI: https//doi.org/10.52304/.v23i4.287

I. Введение

Одним из наиболее востребованных материалов современной микро- и наноэлектроники остается монокристаллический кремний и диоксид кремния [1, 2]. Так, в последнее время, благодаря созданию квантово-размерных структур на кремнии [3-5] преодолена трудность его использования в фотоэлектронике из-за низкой вероятности излучательной рекомбинации [6-7], и тем самым получен новый импульс его широкого применения в названных областях науки и техники [8]. В производстве кремниевых интегральных схем, кроме качества структуры поверхности, большое значение имеет выбор кристаллографической ориентации кристаллов-подложек, например, плоскости (111) окисляются быстрее, чем плоскости (100), вследствие большой поверхностной плотности упаковки атомов [9-11], способных вступать в реакцию окисления [12]. Степень очистки оказывает непосредственное влияние на качество продукции, поэтому все больше микроэлектронных компаний прилагают усилия в этом направлении [13-17]. Особую важность проблема чистоты поверхности приобрела с возникновением планарной технологии [18], при которой свойства поверхности оказывают существенное влияние на параметры приборов. Знание механизма адсорбции и десорбции примесей на поверхности полупроводниковых материалов важно для проведения целенаправленного эффективного процесса очистки [19]. Также ориентационные эффекты при травлении поверхности кристаллов считаются немаловажными при

получении белого света из GaN на основе кремниевых светодиодов [20-22]. Существуют различные методы получения атомарно чистых поверхностей материалов [23-25]. Каждый из них имеет определенные преимущества и недостатки. Поэтому универсальной процедуры очистки не существует. Для каждого материала, как правило, требуется индивидуальная методика или даже комбинация нескольких методик. В настоящее время наиболее перспективным методом получения атомарно чистых поверхностей представляется низкоэнергетичное ионное и плазмохимическое травление [26]. Вместе с тем, в литературе практически не представлены исследования, в которых проводилось бы сопоставление очистки поверхности ионной бомбардировкой и электронно-спектроскопическими методами.

Большой объем исследований по очистке поверхности кристаллов кремния проведен за последние 20 лет. Изучены различные условия проведения очистки поверхности, использовались различные методы и подходы к решению поставленной задачи. Убедительно показано улучшение характеристик кристаллов кремния, необходимых для тех или иных практических применений. Тем не менее в настоящее время нет универсального оборудования и технологического процесса очистки поверхности полупроводниковых пластин, полностью удовлетворяющих всех производителей полупроводниковых изделий.

Таким образом, в производственных центрах мира при получении МДП структур перед напылением пленок, перед диффузией атомов и другими технологическими процедурами приходится проводить очистку поверхности подложки кремния от окисной пленки методом ионной бомбардировки и последующего отжига. При этом приходится много раз сталкиваться с поверхностью кремния в процессе окисления, физически и химической адсорбции газов, ионной бомбардировки, травления и последующего отжига. Сравнительное исследование спектроскопии полного тока (ПТ) кремния и оксида кремния представляет определенный интерес.

Для исследования поверхности кремниевых пластин применяют различные методы контроля. Для точного определения состояния и свойств поверхности подложек оптимально использовать комбинации нескольких методов контроля поверхности полупроводниковых пластин. Данная работа посвящена исследованию окисления поверхности кремния в вакууме методом спектроскопии ПТ с последующим отжигом. Измерения проводили на монокристалле Si(111).

II. Описание объекта и методов исследования

Подробное описание методики спектрометрии полного тока имеется в [27-33]. Спектры ПТ кристаллов кремния получены при облучении электронами с энергией 0–100 эВ, ток ~10^{-8} А (ток ионов Cs^+ и Cl^- ~10^{-6} А, энергия 3 кэВ). Чистоту поверхности контролировали по спектрам ВИМС. В качестве образцов использовали пластинки монокристаллов кремния *p*-типа (КДБ-7.5) с ориентацией грани (111). Рабочий вакуум при проведении исследований составлял 10^{-9} Торр.

III. Описание и анализ результатов

Перед началом работы по спектроскопии ПТ были параллельно сняты масс-спектры ВИ с поверхности грязного, не отожжённого, кремния методом ВИМС. Результаты исследований зонных структур кремния и оксида кремния методом спектроскопии ПТ показывают, что распределение плотности состояний в этих материалах похожи, в валентной зоне имеются (0–14 эВ) три максимума плотности заполненных состояний. Зона проводимости характеризуется двумя экстремумами в интервале энергии между уровнем Ферми и вакуума. По функции плотности состояний спектры ПТ кремния и оксида кремния не должны содержать интенсивной тонкой структуры. Однако, поверхность этих веществ характеризуется в большей степени ковалентной связью (51%), энергетическая структура приповерхностной области может существенно отличаться от объемной и подвергается сильной геометрической перестройке [34].

На рис. 1 приведены спектры ПТ в процессе адсорбции газов на поверхности кремния. Наблюдение газовой адсорбции по спектрам ПТ определяется характером перестройки структуры плотности состояний в приповерхностной области кремния. В случае физической адсорбции, когда энергия взаимодействия атомов невелика, можно ожидать, что электронная структура поверхности существенно не изменится. Интенсивность сигналов подложки ослабляется вследствие дополнительного рассеяния в адсорбционном слое. Адсорбция таких газовых молекул, как CO, CO_2 и H_2O не вносит особенностей в спектр ПТ кремния,

©Академия наук Республики Узбекистан, 2021 г.

они только ослабляют его интенсивность [33]. В случае хемосорбции, когда энергия между атомами подложки и газов значительна и происходит электронный обмен между подложкой и адсорбированной частицей, можно ожидать появления дополнительных особенностей в спектрах, обусловленных возбуждением гибридизированных электронных состояний [28, 30].

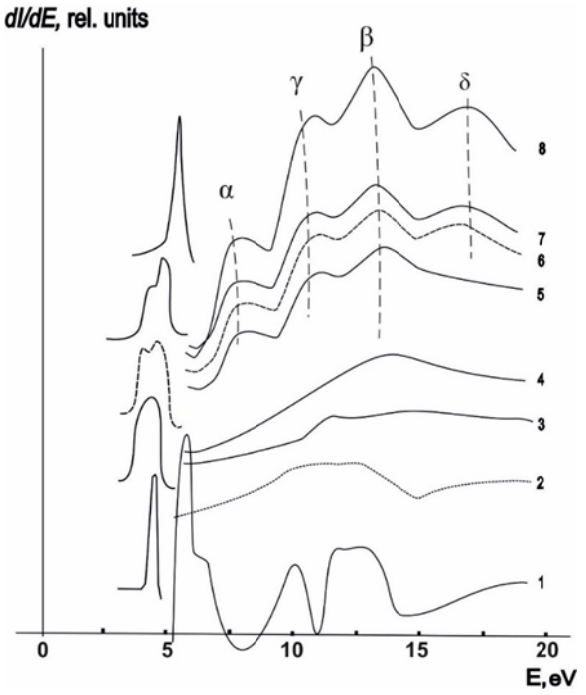


Рисунок 1. Изменение спектра ПТ Si(111) в процессе адсорбции газов и последующего отжига: *1* – чистый кремний со структурой 7×7, *2* – выдержка 10 мин в вакууме 10^{-9} Па, *3* – выдержка 20 мин в вакууме 10^{-9} Па, *4* – выдержка 2 часа в вакууме 10^{-9} Па, *5* – отжиг при температуре 200°С, *6* – отжиг при температуре 600°С, *7* – отжиг при температуре 700°С, *8* – отжиг при температуре 800°С

Одной из особенностей метода электронной спектроскопии ПТ является возможность параллельного контроля за величиной потенциала поверхности по положению первичного максимума в спектре [27, 35, 36]. Проведение таких измерений важно при исследовании адсорбционных процессов, тем более что при сравнительном анализе смещения первичного максимума и всего спектра можно выделить два компонента изменения работы выхода, один обусловлен изменением сродства, а другой изменением изгиба зон [30]. Так осуществляется дополнительный контроль за состоянием адсорбционного покрытия.

Проследим за изменением спектра ПТ и работы выхода образца Si(111) в процессе адсорбции газов при комнатной температуре. Кривая 1 на рис. 1, соответствующая спектру ПТ чистой поверхности Si(111) со структурой 7×7, приведена для сравнения.

Кривая 2 соответствует выдержке образца в течение 10 мин в вакууме при комнатной температуре, сопровождается уменьшением работы выхода примерно на 0.5 эВ и снижением интенсивности максимумов в спектре ПТ чистого кремния. При этом наблюдается только смещение первичного максимума, а весь спектр не изменяет своего положения относительно уровня Ферми (что говорит о неизменности изгиба зон). Следовательно, на первой стадии адсорбции изменение работы выхода происходит вследствие уменьшения электронного сродства. На этой стадии адсорбции (физическая адсорбция) прогрев образца (до 500°С) приводит к очистке поверхности кремния от адсорбированного слоя, величина потенциала поверхности и вид спектра ПТ возвращаются к первоначальным.

Дальнейшая выдержка образца в течение 20 мин при комнатной температуре (кривая 3) приводит к дальнейшему уменьшению работы выхода (на ~0.7 эВ), причем весь спектр смещается вместе с первичным максимумом, что свидетельствует об уменьшении поверхностного изгиба зон. Это, в свою очередь, указывает на уменьшение отрицательного заряда в поверхностных состояниях. Полученный результат находится в соответствии с представлениями о механизме хемосорбции кислорода, по которому кислород занимает свободные поверхностные валентности кремния, уменьшая плотность поверхностных электронных состояний.

Из этих кривых видно, что интенсивности пиков очень слабые, не резкие. Это происходит за счет рассеяния электронов в поликристаллической решетке адсорбированного слоя. Полуширина первичного пика равна примерно 1.2 эВ, наблюдается её уширение. Это говорит о степени неоднородности поверхности исследуемого образца. Первичный пик при энергиях электронов 3.5 эВ показывает начало отсчета кинетической энергии электронов и соответствует положению уровня вакуума на энергетической оси.

Отжиг при температуре 200°С не приводит к заметному изменению в спектре, только увеличивается интенсивность кривой, характерной спек-

©Академия наук Республики Узбекистан, 2021 г.

тру ПТ SiO_x. После температурного отжига в течение 10 минут при температуре 600°C начинается удвоение первичного пика. Если на поверхности островковой пленки происходит раздвоение первичного пика, энергетическое положение одного соответствует работе выхода подложки, а другого работе выхода поверхности островка. Раздвоение первичного пика указывает на образование углеродных и оксидных соединений кремния.

Как видно, в спектре ПТ появляется максимум δ при энергии 17 эВ (что на 13 эВ больше посравнению с первичным пиком). сравнение с данными NEXAFS, TDOS [29] показывает, что этот максимум соответствует возбуждению 2p состояния атома углерода на незаполненные состояния выше уровня вакуума. По форме первичного пика можно сказать, что после отжига при температуре 700°C поверхность полностью покрывается сплошным окисным слоем. Проявление максимумов α, β, γ указывает на поверхностные электронные состояния, характерные для окисленного кремния.

Можно заметить, что при температуре отжига после 500°C начинается увеличение пика ионов углерода на поверхности. При сравнении спектров ПТ обнаружено, что при высоких температурах отжига кремния выше 500°C междоузельный углерод выходит из объема на поверхность кремния. Далее отжиг до температуры 1000°C не приводит к очистке поверхности от углерода и её соединений.

Дифракционная структура, присутствующая в спектрах ПТ, содержит определенную информацию о свойствах геометрической структуры поверхности. При исследовании монокристаллических образцов в энергетической зависимости интенсивности отраженного пучка проявляются дополнительные особенности в интервале энергий первичных электронов, соответствующие условиям появления дифракционных пучков. Эти особенности наблюдаются при энергиях, несколько меньших порога появления дифракционного пучка, в виде чередующихся экстремумов. Согласно существующим представлениям [37], тонкая структура обусловлена многократным рассеянием дифракционного пучка на поверхностном потенциальном барьере, что при определенных соотношениях между параметрами барьера и импульса электрона приводит к резонансному изменению интенсивности отраженного и проходящего пучков. Это явление известно под названием поверхностного резонанса, или резонанса на поверхностных состояниях [29], поскольку в динамической теории дифракции особенности поверхностного рассеяния связываются с квазистационарными поверхностными состояниями, расположенными выше уровня вакуума. Образцы с нарушенной поверхностью не дают дифракционной картины (например, после ионной бомбардировки, адсорбции газов, или в поликристаллических образцах), следовательно, дифракционный компонент в спектре будет отсутствовать. Также это относится к измерениям температурной зависимости спектров ПТ. Известно, что интенсивность дифракционных пучков уменьшается с ростом температуры образца. Поскольку волнообразная особенность связана с многократным рассеянием дифракционного пучка на поверхностном потенциальном барьере, то уменьшение его интенсивности с ростом температуры должно приводить к уменьшению интенсивности дифракционной особенности в спектре ПТ. Используя один из рассмотренных критериев, можно уверенно выделить из спектра ПТ особенности дифракционной природы. Перспективность дифракционных эффектов в спектрах ПТ дает возможность получать не только качественную, но и количественную информацию о структуре поверхности и динамике поверхностных частиц. Как видно, при последовательной выдержке и отжиге кристаллов кремния наблюдается окисление поверхности кремния. Отжиг приводит к усилению наблюдаемых эффектов. Даже отжиг до температуры 1000°C не приводит к очистке поверхности от кислорода, углерода и его соединений. Проведенные исследования при разных условиях показали, что структура поверхностного состояния зависит не только от температуры, но и от времени и вакуумных условий.

IV. Заключение

Проведение сравнительных измерений спектров ПТ на монокристаллической поверхности кремния и на той же поверхности, но с нарушенной геометрической структурой, показывает, что образцы с нарушенной поверхностью не дают дифракционной картины, и, следовательно, дифракционная компонента в спектре будет отсутствовать. Также это относится к измерениям температурной зависимости спектров ПТ. Известно, что интенсивность дифракционных пучков

©Академия наук Республики Узбекистан, 2021 г.

уменьшается с ростом температуры образца. Поскольку волнообразная особенность связана с многократным рассеянием дифракционного пучка на поверхностном потенциальном барьере, то уменьшение ее интенсивности с ростом температуры должно приводить к уменьшению интенсивности дифракционной особенности в спектре ПТ. Используя один из рассмотренных критериев, можно уверенно выделить из спектра ПТ особенности дифракционной природы. Перспективность дифракционных эффектов в спектрах ПТ дает возможность получать не только качественную, но и количественную информацию о структуре поверхности и динамике поверхностных частиц.

Таким образом, в использовании температурного отжига для очистки поверхности кремния от загрязнений, есть свои плюсы и минусы. Нельзя допустить длительный отжиг при высоких температурах, который приводит к окислению кремния. А использование кратковременной вспышки можно использовать только для удаления физически (не химически) адсорбированного слоя атомов.

Метаданные

Total current spectroscopy of silicon oxide

U.B. Sharopov[1,2]

[1]Physical-Technical Institute NGO "Physics-Sun", Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Chingiz Aitmatov st., 2, 100084, Tashkent, Uzbekistan
[2]Institute of Materials Science, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Chingiz Aitmatov st., 2, 100084, Tashkent, Uzbekistan

In this work, we consider the experimental data on the oxidation of the silicon surface in vacuum with subsequent annealing obtained by total current spectroscopy. Studies have shown that when using temperature annealing to clean the silicon surface from contamination, there are pluses and minuses. Prolonged annealing at high temperatures, which leads to silicon oxidation, must not be allowed. And the use of a short time flash can only be used to remove a physically (not chemically) adsorbed layer of atoms.

Keywords: total current spectroscopy, silicon, annealing, surface

Литература (References)

[1] A. Komilov. Gallium content-dependent efficiency limits of CIGS solar cells at AM1.5G solar irradiance. J. Photonics Energy **11** (2021). https://doi.org/10.1117/1.JPE.11.035501.

[2] A. Kuddus, R. Islam, S. Tabassum, A.B. Abu. Synthesis of Si NPs from River Sand Using the Mechanochemical Process and its Applications in Metal Oxide Heterojunction Solar Cells. Silicon **12**, 1723-1733 (2020). https://doi.org/10.1007/s12633-019-00267-6.

[3] N.N. Gerasimenko, Y.N. Parhomenko, V.Y. Troitskiy, A.V. Irzhak, M.N. Pavluchenko, K.K. Djamanbalin, A.S. Belogorohov. Quantum-dimensional structures produced by ion implantation. Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms. **206** 644-647 (2003). https://doi.org/10.1016/S0168-583X(03)00810-3.

[4] A.G. Komilov. Influence of CdS buffer layer thickness on the photovoltaic parameters of solar cells. Appl. Sol. Energy. **54**, 308-309 (2018). https://doi.org/10.3103/S0003701X18050092.

[5] A. Kaity, S. Singh, P.N. Kondekar. Silicon-On-nothing electrostatically doped junctionless tunnel field effect transistor (SON-ED-JLTFET): A short channel effect resilient design. Silicon **13**, 9-23 (2021). https://doi.org/10.1007/s12633-020-00404-6.

[6] C. Li, Z. He, Q. Wang, J. Liu, S. Li, X. Chen, W. Ma, Y. Chang. Performance improvement of PEDOT: PSS/N-Si heterojunction solar cells by alkaline etching. Silicon, (2021). https://doi.org/10.1007/s12633-021-01034-2Li

[7] N. Laxmi, S. Routray, K.P. Pradhan. III-Nitride/Si tandem solar cell for high spectral response: Key attributes of auto-tunneling mechanisms Silicon **12**, 2455-2463 (2020). https://doi.org/10.1007/s12633-019-00342-y.

[8] M.S. Choi, H.G. Na, A. Mirzaei, J.H. Bang, W. Oum, S. Han, S.-W. Choi, M. Kim, C. Jin, S.S. Kim, H.W. Kim. Room-temperature NO_2 sensor based on electrochemically etched porous silicon. J. Alloys Compd. **811**, 151975 (2019). https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.151975.

[9] M.K. Karimov, U.O. Kutliev, S.K. Ismailov, O.M. Uchkun o'g'li. Low energy Ar+Ion scattering on InGaP(001) surface. Journal Surf. Sci. Nanotechnol. E **18**, 164-167 (2020). https://doi.org/10.1380/EJSSNT.2020.164.

[10] M.K. Karimov, U.O. Kutliev, S.B. Bobojonova. Investigation of angular spectrum of scattered inert gas ions from the InGaP (001) surface. Phys. Chem. Solid State **22**, 742-745 (2021). https://doi.org/10.15330/pcss.22.4.

[11] M.K. Karimov, U.O. Kutliev, K.U. Otabaeva, M.U. Otabaev. Angular distributions of scattered Ne and Ar ions at the grazing incidence on the InGaP (001) 110 Surface, J. Nano-Electron. Phys. **12,** 05032-1-05032–4 (2020). https://doi.org/10.21272/jnep.12(5).05032.

[12] U. Khalilov, A. Bogaerts, E.C. Neyts. Toward the understanding of selective Si nano-oxidation by atomic scale simulations/ Acc. Chem. Res. **50**, 796-804 (2017). https://doi.org/10.1021/acs.accounts.6b00564.

[13] L. Zong, B. Zhu, Z. Lu, Y. Tan, Y. Jin, N. Liu, Y. Hu, S. Gu, J. Zhu, Y. Cui. Nanopurification of silicon from 84% to 99.999% purity with a simple and scalable process. Proc. Natl. Acad. Sci. (USA) **112**, 13473-13477 (2015). https://doi.org/10.1073/pnas.1513012112.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2021 г.

[14] A. Komilov. Study of the possibility of use of α-Si:H solar elements in photovoltaic thermal converters, Appl. Sol. Energy. **51**, 140-143 (2015). https://doi.org/10.3103/S0003701X15020048.
[15] D. Akinwande, C. Huyghebaert, C.-H. Wang, M.I. Serna, S. Goossens, L.-J. Li, H.-S.P. Wong, F.H.L. Koppens. Graphene and two-dimensional materials for silicon technology. Nature **573**, 507-518 (2019). https://doi.org/10.1038/s41586-019-1573-9.
[16] F. Shimura. Single-crystal silicon: growth and properties. In: Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials (Springer International Publishing, Cham, 2017). https://doi.org/10.1007/978-3-319-48933-9_13.
[17] Y. Gao, Y. Qin, C. Dong, G. Li. From crater eruption to surface purification of raw silicon: A treatment by pulsed electron beam, Appl. Surf. Sci. **311**, 413-421 (2014). https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.05.076.
[18] C. Papadopoulos. Silicon planar processing and photolithography, 7-14 (2016). https://doi.org/10.1007/978-3-319-31742-7_2.
[19] S.R. Morrison. Adsorption and desorption. In: The Chemical Physics of Surfaces. (Springer US, Boston, MA, pp 251-295, 1990). https://doi.org/10.1007/978-1-4899-2498-8_7.
[20] B. Vincent, S.U. Aswathy, T.D. Subash, T.D. Subha. A novel approach to white light radiation from silicon btsed Tunnel junction LEDs. Silicon (2020). https://doi.org/10.1007/s12633-020-00599.
[21] U.O. Kutliev, M.K. Karimov, F.O. Kuryozov, K.U. Otabaeva. Analysis of InGaP(001) surface by the low energy ion scattering spectroscopy. J. Phys. Conf. Ser. **1889**, 022063 (2021). https://doi.org/10.1088/1742-6596/1889/2/022063.
[22] U.O. Kutliev, M.K. Karimov, M.U. Otaboev. Orientation effects during scattering of Ar^+ ions from the InP(001) surface under grazing-angle ion bombardment. Inorg. Mater. Appl. Res. **11**, 503-506 (2020). https://doi.org/10.1134/S2075113320030272.
[23] R.W. Roberts. Generation of clean surfaces in high vacuum. Br. J. Appl. Phys. **14**, 537-543 (1963). https://doi.org/10.1088/0508-3443/14/9/301
[24] J. Verhoeven. Techniques to obtain atomically clean surfaces. In: Surface Contamination (Springer, US, Boston, MA, 499-512 (1979). https://doi.org/10.1007/978-1-4684-3506-1_33.
[25] F. Xi, H. Cui, Z. Zhang, Z. Yang, S. Li, W. Ma, K. Wei, Z. Chen, Y. Lei, J. Wu., Novel and efficient purification of silicon through ultrasonic-Cu catalyzed chemical leaching, Ultrason. Sonochem. **56**, 474-480 (2019). https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.04.040.
[26] J. Xu, S. Li, W. Zhang, S. Yan, C. Liu, X. Yuan, X. Ye, H. Li. The impact of deposition and annealing temperature on the growth properties and surface passivation of silicon dioxide films obtained by atomic layer deposition. Appl. Surf. Sci. **544** (2021) 148889. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.148889.
[27] U.B. Sharopov, B.G. Atabaev, R. Djabbarganov. Defect formation on the surface of ZnO using low-energy electrons. J. Surf. Investig. X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. **14**, 101-104 (2020). https://doi.org/10.1134/S1027451020010164
[28] U. Sharopov, B. Atabaev, R. Djabbarganov, M. Qurbanov. Mechanism of aggregation colloid centers on surface ionic crystals. In: Adv. Colloid Sci. IntechOpen (2016). https://doi.org/10.5772/65517.
[29] S.A. Komolov. Total current spectroscopy of surfaces. Gordon and Breach Science, Philadelphia, 1992. https://books.google.co.uz/books/about/Total_Current_Spectroscopy_of_Surfaces.html?id=p9QQI962g4YC&redir_esc=y.
[30] U.B. Sharopov, K. Kaur, M.K. Kurbanov, D.S. Saidov, E.T. Juraev, M.M. Sharipov. Controlling the low-temperature ionic purification of a silicon surface by electron spectroscopy. Silicon (2021). https://doi.org/10.1007/s12633-021-01268-0.
[31] U.B. Sharopov, B.G. Atabaev, R. Djabberganov, M.K. Kurbanov. Kinetics of aggregations of F2, F3, X, and colloid centers in LiF/Si(111) films upon low-temperature annealing. J. Surf. Investig. X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. **7**, 195-199. (2013). https://doi.org/10.1134/S1027451012120117.
[32] U.B. Sharopov, B.G. Atabaev, R. Djabbarganov, M.K. Kurbanov, M.M. Sharipov. Procedure for determining defects in sputtered clusters of ionic crystals. J. Surf. Investig. X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. **10**, 245-249 (2016). https://doi.org/10.1134/S1027451016010328.
[33] R. Djabbarganov, B.G. Atabaev, Z.A. Isakhanov, U.B. Sharopov. Energy threshold of the atomic and cluster sputtering of some elements under bombardment with Cs, Rb, and Na ions. J. Surf. Investig. X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. **13,** 640–643 (2019). https://doi.org/10.1134/S1027451019040049.
[34] E.Y. Schwartz. Dielectric materials: Radiation processes and radiation resistance (Riga, 1989).
[35] U.B. Sharopov, K. Kaur, M.K. Kurbanov, D.S. Saidov, S.R. Nurmatov, M.M. Sharipov, B.E. Egamberdiev. Comparison of electron irradiation on the formation of surface defects in situ and post thin-film LiF/Si(111) deposition. Thin Solid Films. **735**, 138902 (2021). https://doi.org/10.1016/j.tsf.2021.138902.
[36] A.S. Komolov, E.F. Lazneva, N.B. Gerasimova, Y.A. Panina, V.S. Sobolev, A.V. Koroleva, S.A. Pshenichnyuk, N.L. Asfandiarov, A. Modelli, B. Handke, O.V. Borshchev, S.A. Ponomarenko. Conduction band electronic states of ultrathin layers of thiophene/phenylene co-oligomers on an oxidized silicon surface. J. Electron Spectros. Relat. Phenomena **235**, 40-45 (2019). https://doi.org/10.1016/j.elspec.2019.07.001.
[37] S.A. Pshenichnyuk, A. Modelli, N.L. Asfandiarov, E.F. Lazneva, A.S. Komolov. Electron stimulated ring opening in diphenylphthalide dicarboxylic acid: Its likely role in the unique properties of phthalide-based materials. J. Chem. Phys. **151**, 214309 (2019). https://doi.org/10.1063/1.5130152.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2021 г.

Оксидланган кремнийнинг тўлиқ ток спектроскопияси

У.Б. Шаропов[1,2]

[1]Физика-техника институти НПО "Физика-Қуёш", Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси, Чингиз Айтматов кўчаси, 2, 100084, Тошкент, Ўзбекистон
[2]Материал шунослик институти Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси, Чингиз Айтматов кўчаси, 2, 100084, Тошкент, Ўзбекистон

Ушбу ишда тўлиқ ток спектроскопия услуби асосида кремний сиртининг вакуумда оксидланиши бўйича экспериментал маълумотларни кўриб чиқилган. Тадқиқотлар шуни кўрсатдики, кремний сиртини ифлосланишдан тозалаш учун ҳароратдан фойдаланиш ўзининг афзаллик ва камчиликлар мавжуд. Кремнийнинг оксидланишига олиб келадиган юқори ҳароратларда узоқ муддат қиздиришга йўл қўймаслик керак. Қисқа муддатли қиздиришдан фақат атомларнинг физикавий (кимёвий эмас) адсорбсияланган қатламини олиб ташлаш учун фойдаланилиши мумкин.

Калит сўзлар: тўлиқ ток спектроскопияси, кремний, қиздириш, сирт.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2021 г.