



Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 538.9

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/12304>**XPS исследования физико-химического состояния поверхности тонких эпитаксиальных и магнетронных слоев олова****О. А. Чувенкова¹, Н. И. Бойков¹, С. В. Рябцев¹, Е. В. Паринаова¹, Р. Г. Чумаков², А. М. Лебедев², Д. Смирнов³, А. Макарова⁴, С. С. Титова¹, К. А. Фатеев¹, С. Ю. Турищев¹**¹Воронежский государственный университет,
Университетская пл., 1, Воронеж 394018, Российская Федерация²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
пл. Академика Курчатова, 1, Москва 123182, Российская Федерация³Free University of Berlin,
Arnimallee 22, Berlin 14195, Germany⁴Dresden University of Technology,
Zellescher Weg 18, Dresden 01069, Germany**Аннотация**

Тонкие слои системы олово-кислород нанометровых толщин и структуры на их основе являются актуальными объектами разработок для применения в современных устройствах, например, в микроэлектронике. Миниатюризация электронных устройств, в целом, достижение эффективности энергопотребления при функционировании таких устройств, оптимальные режимы их работы определяют стратегии применения структур системы олово-кислород. В первую очередь обоснование способа формирования нанослоев системы олово-кислород. Существенной является зависимость свойств формируемых нанослоев от состояния их поверхности.

Статья содержит результаты прямых экспериментальных исследований состава и физико-химического состояния поверхности тонких нанослоев системы олово-кислород. Для формирования изученных структур были использованы востребованные и популярные методы магнетронного распыления и молекулярно-лучевой эпитаксии. Применялся метод рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии с использованием синхротронного излучения, которое обладает высокой интенсивностью и возможностью оптимального выбора энергии возбуждения спектра, что важно для малого количества изучаемого материала. После формирования объекты исследования хранились в лабораторных условиях несколько недель перед синхротронными исследованиями.

Показаны различия в составе и физико-химическом состоянии поверхности тонких слоев олова, сформированных магнетронным распылением или эпитаксиально, а затем окисленные естественным путем. Пять монослоев олова, сформированные методом молекулярно-лучевой эпитаксии, делают возможной диффузию кислорода атмосферы, который окисляет находящийся под нанослоем Sn буферный слой Si на подложке кремния. В то же время поверхность пленки олова, полученной магнетронным распылением, по своему физико-химическому состоянию близка естественному оксиду SnO_{2-x} .

Результаты работы могут быть полезны для определения оптимальных подходов к формированию и последующей модификации тонких и сверхтонких слоев оксидов олова для задач создания активных слоев современных электронных устройств.

Ключевые слова: олово и его оксиды, физико-химическое состояние, состав, эпитаксиальные нанослои, магнетронные нанослои, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, синхротронные исследования

✉ Турищев Сергей Юрьевич, e-mail: tsu@phys.vsu.ru

© Чувенкова О. А., Бойков Н. И., Рябцев С. В., Паринаова Е. В., Чумаков Р. Г., Лебедев А. М., Смирнов Д., Макарова А., Титова С. С., Фатеев К. А., Турищев С. Ю., 2024



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

Источник финансирования: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда в рамках научного проекта № 23-22-00465.

Для цитирования: Чувенкова О. А., Бойков Н. И., Рябцев С. В., Парина Е. В., Чумаков Р. Г., Лебедев А. М., Смирнов Д., Макарова А., Титова С. С., Фатеев К. А., Турищев С. Ю. XPS исследования физико-химического состояния поверхности тонких эпитаксиальных и магнетронных слоев олова. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2024;26(3): 558–564. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/12304>

For citation: Chuvenkova O. A., Boikov N. I., Ryabtsev S. V., Parinova E. V., Chumakov R. G., Lebedev A. M., Smirnov D., Makarova A., Titova S. S., Fateev K. A., Turishchev S. Yu. XPS investigations of thin epitaxial and magnetron tin layers surface physico-chemical state. *Condensed Matter and Interphases*. 2024;26(3): 558–564. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/12304>

1. Введение

Наноструктуры системы олово-кислород привлекают широкий интерес исследователей и применяются для решения различных современных задач науки, техники и технологий [1–3]. Оксид олова SnO₂ активно применяется в микроэлектронике, например, для создания структур резистивных газовых сенсоров [4–6], ряда других устройств. Планарные слоистые структуры являются важным классом объектов, на основе которых реализуется высокая технологичность слоев оксидов олова, в том числе толщин нанометрового диапазона при относительной простоте их создания [7–9]. Варьируя методы создания и обработки, возможно управлять морфологией, составом, структурой, физико-химическим состоянием в целом и, как следствие, свойствами формируемых структур, получая оптимальные размеры, энергопотребление устройств на их основе, скорость срабатывания и другие функциональные характеристики. Метод молекулярно-лучевой эпитаксии позволяет получать упорядоченные слои олова минимальных толщин, вплоть до единиц нанометров, которые, например, при последующей модификации, могут обладать набором уникальных характеристик при вариации их состава. Перспективным может быть использование слоистых эпитаксиальных гетероструктур олова и кремния для термоэлектрики [10]. В то же время распространенным методом формирования тонких слоистых структур системы олово-кислород является метод магнетронного распыления [11]. Этот метод позволяет существенно варьировать состав и структуру формируемых и модифицируемых слоев олова в сочетании с простотой и гибкостью в управлении режимами формирования. Очевидно, что на свойства тонких слоев олово-кислород будет оказывать существенное влияние состав поверхности и границ раздела, в значительной степени определяя свойства структур на их основе. Поэтому применение прямых экспериментальных методов исследования чувствительных к составу, физико-химическому состоянию поверхности тонких слоев

чрезвычайно важно. К таким методам относится рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (XPS – X-ray photoelectron spectroscopy). Этот метод позволяет без разрушения получить высокоточные экспериментальные данные о зарядовом состоянии атомов, входящих в состав нескольких нанометров поверхности изучаемого объекта, исследовать фазовый состав. Использование высокоинтенсивного синхротронного излучения дает возможность выбора энергии квантов для возбуждения фотоэлектронного спектра. Это делает метод XPS точным универсальным инструментом изучения физико-химического состояния поверхности даже при малом количестве вещества, что характерно для слоев наноразмерной толщины, в том числе системы олово-кислород [12–15]. В настоящей работе приводятся результаты исследований методом XPS с использованием синхротронного излучения физико-химического состояния поверхности тонких эпитаксиальных и магнетронных слоев олова, сформированных на подложках кристаллического кремния.

2. Экспериментальная часть

Метод молекулярно-лучевой эпитаксии использовался для получения нанослоев олова на буферном слое Si толщиной 50 нм, выращенном на подложке Si (001) [10]. Эти образцы мы назовем «Epitaxy Sn/Si». Подготовленные после очистки и высушивания подложки перемещались в сверхвысоковакуумную камеру. После десорбции термического оксида при температуре 840 °C на сформированном буферном слое кремния толщиной 50 нм выращивались (осаждались) 5 монослоев атомов олова (~ 1.6 нм) из эффузионной ячейки. После формирования образцы находились в лабораторных условиях несколько недель перед синхротронными исследованиями. Контроль методом атомно-силовой микроскопии показал сплошность и равномерность сформированного слоя олова.

Магнетронное распыление применялось для получения слоев олова на кремнии толщиной 30 нм. Эти образцы мы назовем «Magnetron Sn/Si».

Распыление мишени олова чистотой 99.999 % проводилось в плазме аргона на постоянном токе. Использовались предварительно подготовленные и очищенные подложки Si (100). Давление аргона в рабочей камере составляло 10^{-3} Торр, ток разряда 60 мА, напряжение 360 В. Толщина пленки определялась временем напыления. Морфология контролировалась методом растровой электронной микроскопии. Сформированы сплошные равномерные гранулированные нанослои с размерами гранул, сопоставимыми с толщиной слоя. Образцы «Magnetron Sn/Si» также хранились в лабораторных условиях несколько недель перед измерением фотоэлектронных спектров.

Исследования физико-химического состояния поверхности образцов были проведены неразрушающим методом XPS. Метод основан на анализе спектра кинетических энергий фотоэлектронов, испускаемых атомами под действием рентгеновского (синхротронного) излучения, и позволяет определять энергии связи электронных уровней возбужденных излучением [см., например, 12, 16]. Использовалось высокоинтенсивное излучение ультрамягкого рентгеновского диапазона синхротронов BESSY-II, Российско-Немецкий канал (Гельмгольц Центр Берлин, Берлин, Германия) [17] и КИСИ-Курчатов, канал НА-

НОФЭС (НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия) [18]. Поток фотонов составлял 10^9 – 10^{11} фотонов/с, ток накопителя 50–300 мА. Глубина анализируемого слоя поверхности [12] и аппаратное уширение составили ~2 нм и 0.1 эВ соответственно. Использовались энергии фотонов синхротронного излучения 800 эВ, что соответствовало максимуму интенсивности синхротронного излучения обоих каналов. Вакуум в экспериментальных камерах составлял $\sim 10^{-10}$ Торр. Калибровка и нормировка спектров проводились с использованием пленки чистого золота на основании положения основного 4f уровня золота и уровня Ферми при тех же условиях регистрации, что и для исследуемых образцов. Дополнительно положение основных уровней также контролировалось по C 1s уровню углеродсодержащих загрязнений на поверхности образцов, приведенному к значению 285.0 эВ согласно [16]. Для обеспечения стока заряда при регистрации спектров использовалось стандартное крепление образцов на держателях типа Omicron flag type.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлен обзорный XPS спектр исследуемых образцов эпитаксиального (Epitaxy Sn/Si) и магнетронного (Magnetron Sn/Si) слоев оло-

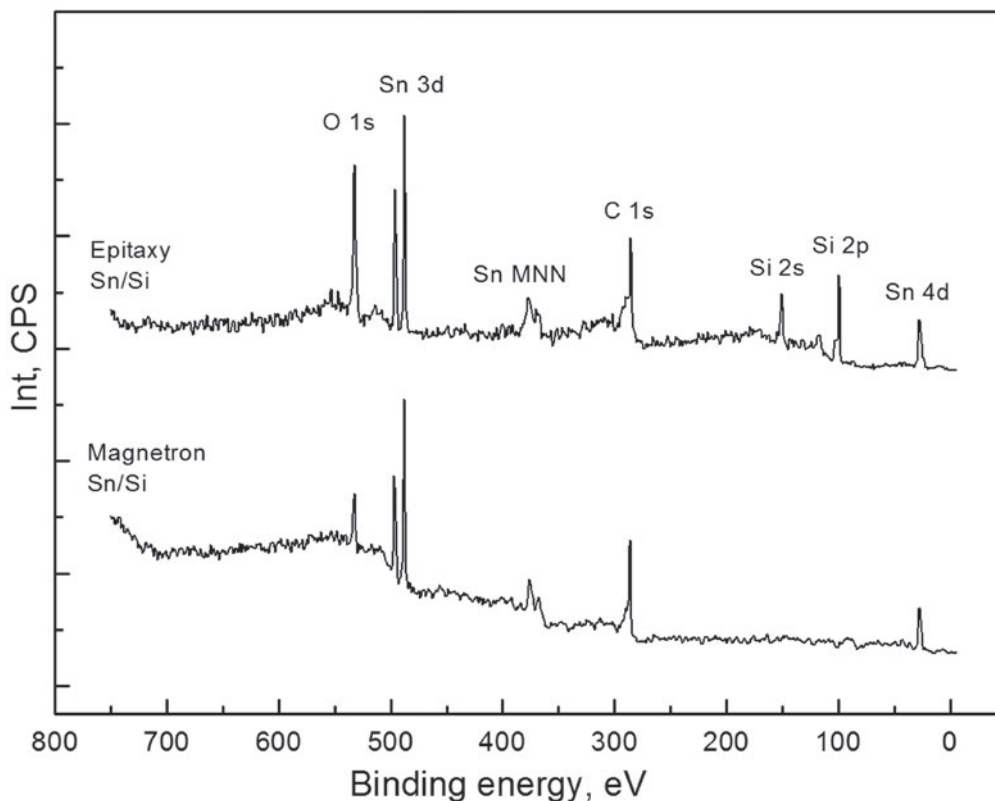


Рис. 1. Обзорные XPS спектры исследуемых образцов эпитаксиального (Epitaxy Sn/Si) и магнетронного (Magnetron Sn/Si) слоев олова

ва. На спектре образца, полученном магнетронным распылением олова (Magnetron Sn/Si), наблюдаются интенсивные линии кислорода O 1s, олова Sn $3d_{3/2,5/2}$, Sn 4d, углерода C 1s и Оже-переходы $M_5N_{4,5}N_{4,5}$ и $M_4N_{4,5}N_{4,5}$ [14, 16, 19]. Линия C 1s четко выражена, что свидетельствует о достаточном количестве углеродсодержащих загрязнений, образующихся на поверхности в результате хранения образцов в лабораторных условиях. В спектре образца, полученного методом молекулярно-лучевой эпитаксии (Epitaxy Sn/Si), помимо указанных выше, наблюдаются линии кремния Si 2p, Si 2s. Наблюдение линий буферного слоя кремния является результатом малой толщины сформированного слоя эпитаксиального олова. Это означает что граница раздела слоев олово-кремний доступна для изучения. При этом линия кислорода O 1s по своей интенсивности заметно превышает аналогичную в образце «Magnetron Sn/Si». Интенсивность этой линии, по нашему мнению, складывается из сигнала от естественно окисленного верхнего эпитаксиального слоя Sn, а также от атомов кислорода, связанных с поверхностью буферного слоя кремния. Это наблюдение, по нашему мнению, является результатом диффузии атмосферного кислорода через эпитаксиальный слой олова к его границе с более электроотрицательным кремнием буферного слоя. Линия углерода C 1s также достаточно интенсивная, что может свидетельствовать о наличии достаточно большого количества углерода на поверхности данного образца в виде углеродсодержащих загрязнений.

Для детального анализа физико-химического состояния поверхностей и границ раздела исследованных образцов были сняты спектры основных остовных линий олова и кислорода с высоким разрешением. На рис. 2 представлены XPS спектры олова Sn $3d_{5/2}$ эталонного образца диоксида олова SnO₂ [15], эпитаксиального «Epitaxy Sn/Si» и магнетронного «Magnetron Sn/Si» в интервале энергий связи 483–491 эВ. Видно, что Sn $3d_{5/2}$ линия образца, полученного магнетронным распылением, однокомпонентная с энергией связи 486.7 эВ, что несколько ниже значения энергии связи этой линии для эталонного диоксида олова SnO₂, которая составляет 487.2 эВ [14–16]. Такое значение энергии связи атомов олова говорит об относительно неполном окислении до SnO₂ поверхности образца «Magnetron Sn/Si» и соответствует значению энергии связи для промежуточного оксида SnO_{2-x}, ранее показанного в работах [15, 20, 21], например, для поверхности металлической фольги. В спектре образца «Epitaxy Sn/Si», полученном методом молекулярно-

лучевой эпитаксии, наблюдается две компоненты при энергиях связи 487.5 эВ и 486.0 эВ соответственно (рис. 2). Высокоэнергетическая компонента показывает значение энергии связи, близкое к эталонному образцу SnO₂. Низкоэнергетическая компонента малой интенсивности соответствует энергии связи атомов олова в монооксиде SnO, уточненной в [20]. Таким образом, поверхность изученных слоев олова «Magnetron Sn/Si» толщиной 30 нм является однофазной и характеризу-

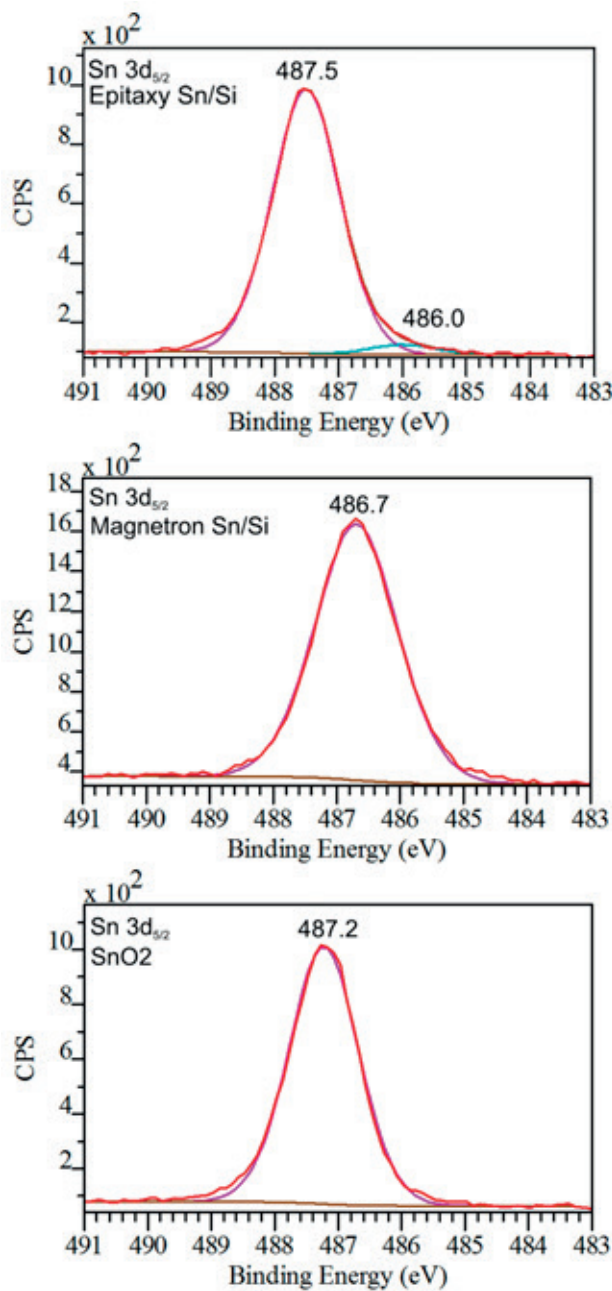


Рис. 2. XPS спектры Sn $3d_{5/2}$ эталонного SnO₂ и исследуемых образцов эпитаксиального (Epitaxy Sn/Si) и магнетронного (Magnetron Sn/Si) слоев олова

ется промежуточным «поверхностным» оксидом олова SnO_{2-x} . Формирование такого оксида происходит при достаточном количестве атомов олова в слое, доступном для естественного окисления при хранении в лабораторных условиях. Толщина эпитаксиального слоя олова предельно мала, к тому же под ним находится поверхность более электроотрицательного буферного кремния. В процессе взаимодействия с атмосферным кислородом при хранении в лабораторных условиях происходит полное окисление атомов олова всего эпитаксиального слоя с образованием тонкого переходного слоя SnO . Этот слой, по нашему мнению, граничит с буферным слоем кремния, который также окисляется в результате диффузии атмосферного кислорода, как это было предположено выше, при рассмотрении интенсивностей основных линий олова и кислорода обзорного спектра. Взаимное окисление границы раздела эпитаксиальных слоев олова и кремния происходит до установления состояния равновесия, сохраняя тонкий переходной слой олова в состоянии SnO . Детальное изучение тонкой структуры фотоэлектронных спектров $2p$ состояний кремния с высоким разрешением видится нам приоритетной задачей при дальнейшем изучении эпитаксиальных структур олово-кремний.

На рис. 3 представлены XPS O 1s спектры эталонного SnO_2 и исследованных образцов эпитаксиального «Epitaxy Sn/Si» и магнетронного «Magnetron Sn/Si» слоев олова. Спектр образца «Magnetron Sn/Si» имеет две компоненты с энергией связи 530.5 эВ и энергией связи 532.1 эВ, которые соответствуют атомам кислорода в поверхностном оксиде SnO_{2-x} [15, 20, 21] и различного вида соединениям кислорода атмосферы, адсорбированным поверхностью [см., например, 14-16]. В образце с эпитаксиальным нанослоем олова в спектре O 1s наблюдаются 3 компоненты при энергиях 531.5, 532.6 и 533.3 эВ. Состояния атомов кислорода с энергией связи 531.5 эВ близки к диоксиду SnO_2 (рис. 3). Незначительное увеличение энергии связи состояний атомов кислорода (как и атомов олова, см. выше) может быть связано с влиянием дополнительного заряда поверхности, создаваемого слоистой структурой образца при ее фазовых превращениях в результате естественного окисления [12]. Компоненты O 1s спектра с энергией связи 533.3 и 532.6 эВ связываются нами с различного вида соединениями кислорода атмосферы, адсорбированными поверхностью [см., например, 14–16] и наблюдаются в спектре эталонного SnO_2 (рис. 3). Однако пик при 532.6 эВ имеет значительно большую интенсивность по сравнению с

эталонном SnO_2 , что связано с энергиями связи оксида кремния, имеющими близкое значение. Это подтверждает высказанные выше предположение об окислении буферного слоя кремния, находящегося под эпитаксиальным слоем олова. Наконец то, что в спектре O 1s образца «Magnetron Sn/Si» мы не наблюдаем состояния при энергии связи ~ 533.3 эВ, говорит о несколько отличных условиях хранения этого образца.

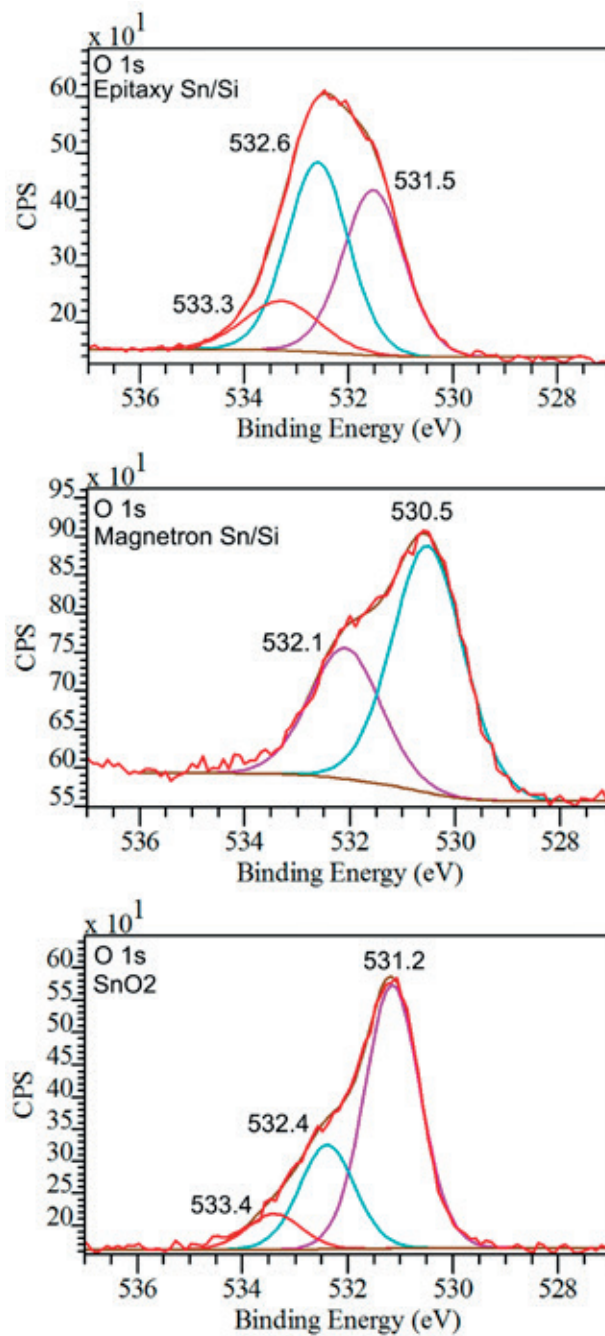


Рис. 3. XPS спектры O 1s эталонного SnO_2 и исследуемых образцов эпитаксиального (Epitaxy Sn/Si) и магнетронного (Magnetron Sn/Si) слоев олова

4. Выводы

В работе изучено физико-химическое состояние поверхности тонких слоев олова, полученных методом магнетронного распыления и молекулярно-лучевой эпитаксии после хранения в лабораторных условиях. Наблюдается общее согласие данных по анализу синхротронных фотоэлектронных спектров, в том числе высокого разрешения для линий Sn $3d_{5/2}$ и O 1s. Показаны различия в составе поверхностных слоев изученных структур. При использовании метода магнетронного распыления для формирования 30 нм слоя Sn с последующим хранением в лабораторных условиях образуется однофазная поверхность естественного оксида олова SnO_{2-x}. Слой олова, сформированный методом молекулярно-лучевой эпитаксии, после хранения такой же длительности в лабораторных условиях полностью окисляется до SnO₂. Поверхность буферного слоя кремния подвергается окислению атомами атмосферного кислорода в результате их диффузии через эпитаксиальный слой олова, при этом формируется тонкий переходной слой SnO. Полученные результаты могут быть использованы при управляемом формировании функциональных нанослоев системы олово-кислород и структур на их основе для различных задач, например, при создании современных микроэлектронных устройств.

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

1. Kong Y., Li Y., Cui X., ... Wang Y. SnO₂ nanostructured materials used as gas sensors for the detection of hazardous and flammable gases: A review. *Nano Materials Science*. 2022;4: 339–350. <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2021.05.006>
2. Huang J., Yu K., Gu C., ... Liu J. Preparation of porous flower-shaped SnO₂ nanostructures and their gas-sensing property. *Sensors and Actuators B*. 2010;147: 467–474. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2010.03.085>
3. Turishchev S., Schleusener A., Chuvenkova O., ... Sivakov V. Spectromicroscopy studies of silicon nanowires array covered by tin oxide layers. *Small*. 2023;19 (10): 22063221-6. <https://doi.org/10.1002/smll.202206322>
4. Wu Q.-H., Li J. Sun S.-G. Nano SnO₂ gas sensors. *Current Nanoscience*. 2010;6: 525–538. <https://doi.org/10.2174/157341310797574934>
5. Vilaseca M., Coronas J., Cirera A., Cornet A., Morante R. J., Santamaria J. Gas detection with SnO₂ sensors modified by zeolite films. *Sensors and Actuators B*. 2007;124: 99–110. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2006.12.009>
6. Shaposhnik A. V., Shaposhnik D. A., Turishchev S. Yu., ... Morante J. R. Gas sensing properties of individual SnO₂ nanowires and SnO₂ sol-gel nanocomposites. *Beilstein Journal of Nanotechnology*. 2019;10: 1380–1390. <https://doi.org/10.3762/bjnano.10.136>
7. Gaggiotti G., Galdikas A., KaEiulis S., Mattogno G., Setkus A. Temperature dependencies of sensitivity and surface chemical composition of SnO₂ gas sensors. *Sensors and Actuators B*. 1995;24-25: 516–519. [https://doi.org/10.1016/0925-4005\(95\)85111-9](https://doi.org/10.1016/0925-4005(95)85111-9)
8. Kwoka M., Ottaviano L., Passacantando M., Santucci S., Czempik G., Szuber J. XPS study of the surface chemistry of L-CVD SnO₂ thin films after oxidation. *Thin Solid Films*. 2005;490: 36 – 42. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2005.04.014>
9. Ryabtsev S. V., Shaposhnik A. V., Lukin A. N., Domashevskaya E. P. Application of semiconductor gas sensors for medical diagnostics. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 1999;59 (1): 26–29. [https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(99\)00162-8](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(99)00162-8)
10. Tonkikh A. A., Zakharov N. D., Eisenschmidt C., Leipner H. S., Werner P. Aperiodic SiSn/Si multilayers for thermoelectric applications. *Journal of Crystal Growth*. 2014;392: 49–51. <http://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2014.01.047>
11. Gangwar A. K., Godiwal R., Jaiswal J., ... Singh P. Magnetron configurations dependent surface properties of SnO₂ thin films deposited by sputtering process. *Vacuum*. 2020;177: 109353-1-9. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109353>
12. Hufner S. (ed.) Very high resolution photoelectron spectroscopy. In: *Lecture Notes in Physics*. Springer Berlin Heidelberg; 2007. 397 p. <https://doi.org/10.1007/3-540-68133-7>
13. Jimenez V. M., Mejias J. A., Espinos J. P., Gonzalez-Elipe A. R. Interface effects for metal oxide thin films deposited on another metal oxide II. SnO₂ deposited on SiO₂. *Surface Science*. 1996;366: 545–555. [https://doi.org/10.1016/0039-6028\(96\)00831-x](https://doi.org/10.1016/0039-6028(96)00831-x)
14. Domashevskaya E. P., Chuvenkova O. A., Ryabtsev S. V., ... Turishchev S. Yu. Electronic structure of undoped and doped SnO_x nanolayers. *Thin Solid Films*. 2013;537(30): 137–144. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2013.03.051>
15. Chuvenkova O. A., Domashevskaya E. P., Ryabtsev S. V., ... Turishchev S. Yu. XANES and XPS investigations of surface defects in wire like SnO₂ crystals. *Physics of the Solid State*. 2015;57(1): 153–161. <https://doi.org/10.1134/s1063783415010072>

16. Crist B. V. *XPS International Inc.*, 1999. V. 1. Режим доступа: www.xpsdata.com
17. Fedoseenko S. I., Iossifov I. E., Gorovikov S. A., ... Kaindl G. Development and present status of the Russian–German soft X-ray beamline at BESSY II. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2001;470: 84–88. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(01\)01032-4](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(01)01032-4)
18. Lebedev A. M., Menshikov K. A., Nazin V. G., Stankevich V. G., Tsetlin M. B., Chumakov R. G. Nano PES photoelectron beamline of the Kurchatov Synchrotron Radiation Source. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2021;15: 1039–1044. <https://doi.org/10.1134/S1027451021050335>
19. Davis L. E., MacDonald N. C., Palmberg P. W., Riach G. E., Weber R. E. *Handbook of Auger electron spectroscopy. Second Edition*. Physical Electronics Industries, Inc; 1976.
20. Чувенкова О. А., Домашевская Э. П., Рябцев С. В., ... Турищев С. Ю. Исследования коммерческих образцов металлической оловянной фольги и оксидов SnO и SnO₂ методом фотоэлектронной спектроскопии в двух диапазонах энергий синхротронного излучения. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2014;16(4): 513–522. Режим доступа: http://www.kcmf.vsu.ru/resources/t_16_4_2014_015.pdf
21. Turishchev S. Yu., Chuvenkova O. A., Parinova E. V., ... Sivakov V. XPS investigations of MOCVD tin oxide thin layers on Si nanowires array. *Results in Physics*. 2018;11: 507–509. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.09.046>
- Информация об авторах**
- Чувенкова Ольга Александровна, к. ф.-м. н., с. н. с., совместная научно-образовательная лаборатория «Атомное и электронное строение функциональных материалов» Воронежского государственного университета и Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).
<https://orcid.org/0000-0001-5701-6909>
chuvenkova@phys.vsu.ru
- Бойков Николай Игоревич, инженер-физик, совместная научно-образовательная лаборатория «Атомное и электронное строение функциональных материалов» Воронежского государственного университета и Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).
<https://orcid.org/0000-0002-0512-8666>
boykov-hfmm@bk.ru
- Рябцев Станислав Викторович, д. ф.-м. н., директор института физики, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).
<https://orcid.org/0000-0001-7635-8162>
ryabtsev@phys.vsu.ru
- Паринова Елена Владимировна, к. ф.-м. н., доцент кафедры общей физики, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).
<https://orcid.org/0000-0003-2817-3547>
parinova@phys.vsu.ru
- Чумаков Ратибор Григорьевич, к. ф.-м. н., с. н. с., Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (Москва, Российская Федерация).
<https://orcid.org/0000-0002-3737-5012>
ratibor.chumakov@gmail.com
- Лебедев Алексей Михайлович, к. ф.-м. н., с. н. с., Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (Москва, Российская Федерация).
<https://orcid.org/0000-0002-4436-6077>
lebedev.alex.m@gmail.com
- Смирнов Дмитрий, к. ф.-м. н., н. с., институт физики материалов, Технический Университет Дрездена (Дрезден, Германия).
anna.makarova@fu-berlin.de
- Макарова Анна, к. ф.-м. н., н. с., институт химии и биохимии, Свободный Университет Берлина (Берлин, Германия).
anna.makarova@fu-berlin.de
- Титова София Сергеевна, преподаватель кафедры общей физики, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).
<https://orcid.org/0000-0001-6860-401X>
titova@phys.vsu.ru
- Фатеев Кирилл Александрович, лаборант-физик кафедры общей физики, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).
fateev@phys.vsu.ru
<https://orcid.org/0009-0005-5352-9594>
- Турищев Сергей Юрьевич, д. ф.-м. н., доцент, заведующий кафедрой общей физики, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).
<https://orcid.org/0000-0003-3320-1979>
tsu@phys.vsu.ru
- Поступила в редакцию 17.10.2023; одобрена после рецензирования 04.12.2023; принята к публикации 06.12.2023; опубликована онлайн 01.10.2024.