

Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 538.9

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/11897>**Электронное строение и состав тонких эпитаксиальных и магнетронных слоев оксида олова по данным синхротронных XANES исследований****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**¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»,
Университетская пл., 1, Воронеж 394018, Российская Федерация²ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»»,
пл. Академика Курчатова, 1, Москва 123182, Российская Федерация³Dresden University of Technology,
18 Zellescher Weg, Dresden 01069, Germany⁴Free University of Berlin,
22 Arnimallee, Berlin 14195, Germany**Аннотация**

Материалы системы олово-кислород и тонкопленочные структуры на их основе являются современными и актуальными для создания широкого ряда электронных приборов, например, резистивных газовых сенсоров высокой чувствительности и малого времени срабатывания при низком энергопотреблении и высокой технологичности. Важным направлением в проработке таких материалов и структур является управление свойствами при вариации технологических режимов формирования. Востребованной является информация о составе, локальном атомном и электронном строении тонких слоев системы олово-кислород при вариации подходов к их получению.

Работа посвящена исследованию электронного строения тонких слоев оксидов олова, полученных современными методами молекулярно-лучевой эпитаксии и магнетронного распыления. Проведено исследование локальной парциальной плотности электронных состояний в зоне проводимости методом спектроскопии ближней тонкой структуры краев рентгеновского поглощения олова и кислорода. Данные получены с использованием высокоинтенсивного синхротронного излучения, позволяющего варьировать энергию квантов монохроматизированного излучения без потерь в интенсивности, что необходимо для получения рентгеноспектральных данных высокого разрешения.

Показано, что состав, локальное атомное окружение, электронный спектр и их особенности зависят от технологии формирования и условий хранения исследованных структур. Синхротронные рентгеноспектральные данные показывают наличие промежуточных оксидов системы олово-кислород в изученных материалах после продолжительного хранения в лабораторных условиях. Полученные данные указывают на возможность управляемой вариации состава, локального атомного окружения и электронного спектра тонкопленочных структур оксидов олова малой толщины. Результаты работы могут быть использованы при формировании и последующей модификации тонких и сверхтонких слоев оксидов олова методами магнетронного распыления и молекулярно-лучевой эпитаксии, а также при дальнейшем их применении в качестве активных слоев устройств микроэлектроники.

Ключевые слова: олово и его оксиды, электронное строение, плотность состояний, локальное атомное окружение, состав, эпитаксиальные нанослои, магнетронные нанослои, ближняя тонкая структура краев рентгеновского поглощения, 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. Электронное строение и состав тонких эпитаксиальных и магнетронных слоев оксида олова по данным синхротронных XANES исследований. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2024;26(1): 153–160. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/11897>

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. Electronic structure and composition of tin oxide thin epitaxial and magnetron layers according to synchrotron XANES studies. *Condensed Matter and Interphases*. 2024;26(1): 153–160. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/11897>

1. Введение

Тонкие слои оксида олова SnO₂ широко применяются в различных областях техники, в том числе микроэлектроники, таких как резистивные газовые сенсоры, прозрачные электроды, катализаторы и др. [1–4]. Методы получения диоксида олова в значительной степени определяют его свойства. Кроме того, на свойства влияют размеры и морфология полученных материалов, в случае слоев это, в первую очередь, толщина, макро- и микроструктура. Так, свойства нанометровых структур ввиду значительного влияния поверхности сильно отличаются от больших по размеру, и могут применяться для создания приборов со значительно улучшенными характеристиками. К таким характеристикам, в первую очередь, следует отнести скорость срабатывания, миниатюрность, энергопотребление и иные. Создание гетероструктур на основе оксида олова и кремния также является перспективным для применения в таких областях техники, как термоэлектрика [5]. Одним из эффективных и высокоточных способов формирования гетероструктур, состоящих из сверхтонких упорядоченных слоев, является метод молекулярно-лучевой эпитаксии [6–8]. Этот метод характеризуется высокой степенью совершенства выращиваемых слоев, в том числе нанометровой толщины, их структурно-фазовых границ и возможностью управления составом, структурой и функциональными свойствами формируемых структур. Этот метод позволяет получать очень тонкие слои олова на поверхности подготовленных подложек, например, кремния. Метод магнетронного распыления позволяет получить высококачественные слои олова в широком диапазоне толщин для использования их в различных областях техники. Преимуществом метода является простота и гибкость управления режимами формирования структур [9–11]. Наиболее заметным недостатком можно считать сложность получения структурно высокоорганизованных сплошных слоев малой толщины,

сопоставимой с эпитаксиальными. Известно, что свойства объектов малой размерности во многом определяются вкладом поверхности. Не являются исключением и тонкие слои системы олово-кислород. Высокоточные экспериментальные методы, обладающие повышенной чувствительностью к составу, специфике локального атомного окружения, электронному спектру, структуре поверхностных слоев изучаемого объекта особенно востребованы. Одним из таких методов является спектроскопия ближней тонкой структуры края рентгеновского поглощения (XANES – X-ray absorption near edge structure) с использованием высокоинтенсивного синхротронного излучения. Возможность изменения энергии квантов синхротронного излучения без изменений в его чрезвычайно высокой интенсивности является необходимым условием получения спектров XANES высокого разрешения. В ультрамягкой рентгеновской области спектра синхротронного излучения спектроскопия XANES обладает высокой чувствительностью к локальному окружению атомов заданного сорта поверхности изучаемого материала или структуры, и поэтому особо актуальна для анализа наноструктур различного состава, в том числе на основе кремния [12–16] и олова [17–21]. В настоящей работе приводятся результаты исследований синхротронным методом XANES состава, атомного и электронного строения тонких слоев олова, сформированных методом молекулярно-лучевой эпитаксии и магнетронного распыления, на подложках кристаллического кремния.

2. Экспериментальная часть

Исследованные образцы «Epitaxy Sn/Si» были получены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке Si (001) с буферным слоем Si толщиной 50 нм [5]. При формировании образцов очищенные и высушенные подложки транспортировались в сверхвысоковакуумную камеру для выращивания пленок, где производилась десорбция термического оксида при температу-

ре 840 °С. Затем на буферный слой кремния толщиной 50 нм из эффузионной ячейки выращивались (осаждались) 5 монослоев атомов олова (~1.6 нм). Перед проведением синхротронных экспериментов образцы хранились в лабораторных условиях несколько недель. Метод просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения показал сплошность и равномерность сформированного слоя олова.

Серия образцов «Magnetron Sn/Si» была получена магнетронным распылением на постоянном токе оловянной мишени чистотой 99.999 % в плазме аргона на подложки Si (100). Давление аргона в рабочей камере составляло 10^{-3} Торр, ток разряда 60 мА, напряжение 360 В. Толщина плёнки определялась временем напыления при постоянных режимах работы установки и составила 30 нм. Контроль морфологии, проведенный методом растровой электронной микроскопии, показал формирование сплошного равномерно гранулированного покрытия. Размер гранулы не превышал толщины слоя. Перед проведением синхротронных экспериментов образцы хранились в лабораторных условиях несколько недель.

Исследования электронного строения образцов были проведены неразрушающим методом XANES, позволяющем получить информацию о специфике локального окружения поглощающих атомов олова и кислорода и эффектах упорядочения в структурной сетке этих атомов анализируемого поверхностного слоя [22]. Метод XANES позволяет получить прямую экспериментальную информацию о распределении локальной парциальной плотности свободных электронных состояний в зоне проводимости изучаемого слоя поверхности [14–17, 20]. Использовалось высокоинтенсивное излучение ультрамягкого рентгеновского диапазона синхротронов BESSY-II, Российско-Немецкий канал (Гельмгольц Центр Берлин, Берлин, Германия) [23] и КИСИ-Курчатов, канал НАНОФЭС (НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия) [24]. Поток фотонов составлял 10^9 – 10^{11} фотонов/с, ток накопителя 50–300 мА. Глубина анализируемого слоя поверхности [25, 26] и энергетическое разрешение для краев Sn $M_{4,5}$ - и O K составляли ~10 нм и 0.1 эВ соответственно. Детектировался полный выход электронов (TEY – total electron yield) при регистрации компенсационного тока образца. Вакуум в экспериментальных камерах составлял ~ 10^{-10} Торр. Угол падения синхротронного излучения составлял 90° к плоскости поверхности.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены спектры XANES Sn $M_{4,5}$ эталонных материалов и исследуемых образцов эпитаксиального (Epitaxy Sn/Si) и магнетронного (Magnetron Sn/Si) слоев олова. К эталонным материалам мы относим спеченный спрессованный порошок поликристаллического тетрагонального диоксида олова SnO₂(T), освеженную *in-situ* в сверхвысоком вакууме спектротметра металлическую фольгу без естественного оксида Sn foil refresh, металлическую фольгу олова Sn foil, для которых спектры XANES Sn $M_{4,5}$ были зарегистрированы экспериментально в тех же условиях, что и изучаемые образцы и известные ранее [17, 19]. Также мы приводим данные, полученные из *ab-initio* расчетов [20] спектров XANES Sn $M_{4,5}$ для таких нестабильных в лабораторных условиях соединений, как орторомбический диоксид олова SnO₂(O) и монооксид олова SnO.

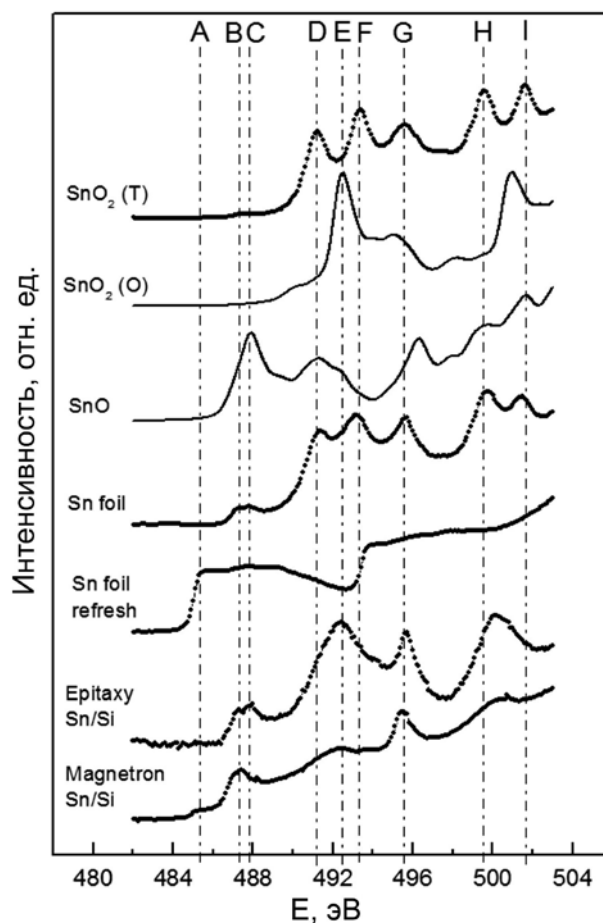


Рис. 1. XANES Sn $M_{4,5}$ эталонных (SnO₂(T), SnO₂(O), SnO, Sn foil, Sn foil refresh) и исследуемых образцов эпитаксиального (Epitaxy Sn/Si) и магнетронного (Magnetron Sn/Si) слоев олова

XANES Sn $M_{4,5}$ ($3d$) спектры поглощения представляют собой распределение p состояний в зоне проводимости, которые согласно дипольным правилам отбора отражают переходы с остовных $3d$ состояний на свободные p и f состояния в зоне проводимости. Распределение основных спектральных особенностей и их относительных интенсивностей, приведенных в единый диапазон для удобства сопоставления спектров на рис. 1, показывают, что по особенностям своей тонкой структуры спектры эталонов весьма отличимы друг от друга и от сформированных нанослоев. Подробное обсуждение тонкой структуры эталонных спектров изложено в работах [19-20]. В спектре исследуемого магнетронного покрытия образца Magnetron Sn/Si наблюдается достаточно выраженная структура краев поглощения $M5$ и $M4$, наиболее интенсивные особенности которых расположены при энергиях ~ 487.1 эВ и ~ 495.5 эВ, $B-C$ и G на рис. 1 соответственно. Тем самым наблюдается спин-дублетное расщепление этих краев ~ 8.4 эВ. Данные особенности по своему энергетическому положению соответствуют монооксиду олова SnO с тонкой структурой XANES спектра при энергиях ~ 487.9 эВ, ~ 491.3 эВ. При этом также наблюдается менее интенсивная структура при энергиях 485.1 эВ (A) и 493.5 эВ (F), с тем же самым спин-дублетным расщеплением, соответствующая металлическому олову без естественного оксида (эталонный спектр образца Sn foil refresh). Еще один «набор» высокоэнергетических особенностей при энергиях ~ 492.3 эВ и ~ 500.7 эВ соответствует орторомбическому диоксиду олова. Таким образом, в образце, полученном магнетронным распылением, в слое поверхности ~ 10 нм, доступном зондированию методом XANES при регистрации Sn $M_{4,5}$ краев поглощения, наряду с металлическим оловом сформировался монооксид и орторомбический диоксид олова. Тем самым 30 нм слой олова, полученный магнетронным распылением оловянной мишени, полностью не окисляется при нахождении на воздухе даже длительное время. Тем не менее, образующиеся в этом слое оксиды являются нестабильными при обычных условиях. Кроме того, отсутствует фаза стабильного тетрагонального диоксида олова с характерной тонкой структурой $M4$ края DFG (рис. 1) при энергиях 491.3 эВ, 493.2 эВ и 495.6 эВ и $M5$ края HI при энергиях соответственно ~ 499.5 эВ и ~ 501.6 эВ. Отметим, что при рассмотрении металлической фольги олова (рис. 1), хранившейся без каких-либо особых

условий, на ее поверхности наблюдается образование стабильного тетрагонального диоксида олова наряду с нестабильными фазами тетрагонального монооксида олова и орторомбического диоксида олова, о чем свидетельствует «размытие» провала E между особенностями D и F при энергиях 491.3 эВ и 493.2 эВ. На поверхности исследуемого 30 нм слоя олова, полученного магнетронным распылением, наблюдается только начальная стадия окисления олова, проходящая через образование промежуточных нестабильных фаз монооксида и орторомбического диоксида олова. Отсутствие стабильной фазы тетрагонального диоксида олова, несмотря на нахождение в лабораторных условиях несколько недель, говорит о, возможно, недостаточно прошедшем периоде окисления слоя олова или о необходимости дополнительных условий для его получения.

При рассмотрении XANES Sn $M_{4,5}$ края поглощения эпитаксиальной пленки олова (Epitaxy Sn/Si) видно, что она тоже имеет весьма выраженную тонкую структуру. Наиболее интенсивные особенности отмечены при энергиях 492.3 эВ (E) и 500.3 эВ, которые, в целом, расположены ближе всего к характерным особенностям тонкой структуры спектра орторомбического диоксида олова SnO₂ (O). Отметим наблюдаемые электронные состояния в области низкоэнергетических спектральных особенностей ~ 487.2 эВ и ~ 495.6 эВ, которые также соответствуют монооксиду олова. Стоит отметить, что распределение электронных состояний в области энергии $\sim 487-488$ эВ в отличие от слоев олова, полученных магнетронным распылением, имеет двойную, расщепленную структуру BC при энергии ~ 487.2 эВ и 487.8 эВ. Аналогичное раздвоение пика мы наблюдаем на поверхности металлической оловянной фольги Sn foil, что вероятно связано с результатом одновременного наличия вакансий в подрешетке кислорода и фазы монооксида олова на поверхности этого образца. Высокая интенсивность особенностей тонкой структуры XANES Sn $M_{4,5}$, соответствующих орторомбическому диоксиду олова, говорит о преобладании этой фазы по сравнению с монооксидом олова. Таким образом, в образце слоев олова, сформированных эпитаксиально, наблюдаются те же самые фазы «промежуточных» оксидов олова SnO и SnO₂(O), что и в слоях, полученных магнетронным распылением, кроме металлического олова. Последний факт связан с критически малой толщиной эпитаксиально-

го нанослоя олова, все атомы которого подвергаются взаимодействию с атомами кислорода. В том числе, в результате нахождения под слоем эпитаксиального олова буферного слоя кремния. Этот слой кристаллического Si в результате заметной электроотрицательности притягивает атомы кислорода, диффундирующие через слой олова, по крайней мере, к границе раздела олово-кремний. При этом в спектре XANES Sn $M_{4,5}$ также отсутствуют особенности тонкой структуры, соответствующие фазе стабильного тетрагонального диоксида олова. Таким образом, представляется возможным эпитаксиально получить тонкие слои промежуточных фаз оксидов олова. Для получения стабильной фазы диоксида олова SnO₂(T) следует изменить параметры формирования или применить дополнительные модифицирующие условия, например, окислительный отжиг.

На рис. 2 представлены O K спектры XANES эталонных (SnO₂(T) и Sn foil) и исследуемых образцов магнетронного (Magnetron Sn/Si) и эпитаксиального (Epitaxy Sn/Si) слоев олова. XANES O K (1s) спектры поглощения представляют собой переходы с основного 1s уровня кислорода на свободные *p* состояния в зоне проводимости. Видно, что спектры представленных эталонных образцов, как и в случае со спектрами поглощения XANES Sn $M_{4,5}$, отличаются между собой по тонкой структуре. Так, диоксид олова тетрагональной модификации имеет выраженный пик А при энергии 533.9 эВ, а также особенности В (536.5 эВ), С (538 эВ), D (540 эВ), E (541.2 эВ), F (544.2 эВ) и G (549.2 эВ). В металлической фольге олова наиболее ярко выражены основные пики А при энергии 533.85 эВ и D при энергии 540 эВ. Остальные особенности тонкой структуры сглажены. Отсутствие данных по краю кислорода в орторомбическом диоксиде олова и монооксиде олова делает интерпретацию края кислорода исследуемых образцов недостаточно полной и является предметом дальнейших исследований.

При рассмотрении края поглощения кислорода в образце слоев олова, полученных магнетронным распылением, наблюдается пик А при энергии 533.9 эВ, а также D при энергии 540 эВ. В целом структура края по своим особенностям и их энергетическому положению схожа с тонкой структурой спектра поглощения фольги олова Sn foil, где также отсутствуют выраженные особенности В, С, E и G спектра эталона диоксида олова. Отличие состоит только в распреде-

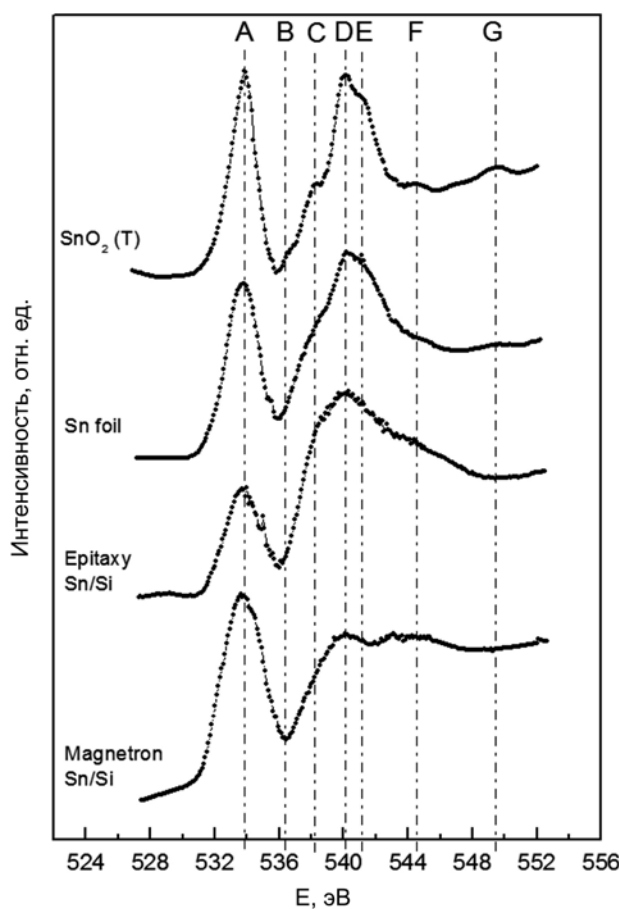


Рис. 2. XANES O K эталонных (SnO₂(T), Sn foil) и исследуемых образцов эпитаксиального (Epitaxy Sn/Si) и магнетронного слоев олова (Magnetron Sn/Si)

лении интенсивностей между двумя основными пиками структуры А и D и в наблюдении незначительного по интенсивности провала при энергии 541.6 эВ.

В образце, полученном методом эпитаксии Epitaxy Sn/Si, также наблюдается пик А при энергии 533.9 эВ и D при энергии 540 эВ. Однако интенсивность низкоэнергетического пика А ниже, чем у пика D. Здесь широкая особенность в области пика D, вероятно, свидетельствует об окислении поверхности эпитаксиального буфера кристаллического кремния, который находится под нанослоем эпитаксиального олова. Выше мы отмечали, что граница слоев олово-кремний доступна для взаимодействия с атмосферным кислородом. В то же время этот интерфейс находится в пределах глубины анализа спектров XANES O K. Более того, форма и положение особенности D хорошо коррелирует с данными по тонкой структуре краев поглощения XANES O K естественно

окисленного кремния [см., например, 14]. Таким образом, сигнал от окисленных атомов кремния границы раздела Si-Sn накладывается на сигнал от оксида олова эпитаксиального нанослоя, формируя спектр, приведенный на рис. 2.

4. Выводы

Наблюдается общее согласие данных по анализу синхротронных спектров XANES олова ($\text{Sn M}_{4,5}$) и кислорода (O K). На поверхности исследуемых образцов Epitaxy Sn/Si и Magnetron Sn/Si присутствуют оксиды, схожие с оксидами на поверхности оловянной фольги Sn foil, но отличные от диоксида олова тетрагональной модификации. Слои, полученные методом молекулярно-лучевой эпитаксии, полностью окислены с преобладанием промежуточных фаз оксидов олова. Слои олова, полученные магнетронным распылением, содержат на поверхности те же самые фазы промежуточных оксидов олова SnO и $\text{SnO}_2(\text{O})$, однако, отмечается наличие неокисленного металлического олова. То есть слои олова при окислении от поверхности проходят одни и те же стадии образования оксидов независимо от метода получения этих слоев. В то же время результат взаимодействия с атмосферным кислородом существенно зависит от толщины сформированного нанослоя как показатель количества доступного для окисления металлического олова. Отсутствие в зарегистрированных синхротронных данных явных следов (тонкой структуры спектров) стабильного тетрагонального диоксида олова свидетельствует о недостаточности условий формирования для его образования. Таким образом, для рассмотренных подходов требуются дополнительные воздействия или условия для получения нанослоев стабильного тетрагонального диоксида олова. Полученные данные показывают возможность тонкого, через режимы формирования и состав, управления локальным атомным строением и электронным спектром тонких слоев оксидов олова, формируемых молекулярно-лучевой эпитаксией или магнетронным распылением, что важно для применения в современных структурах, включая микроэлектронные.

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. Chopra K. L., Major S., Pandya D. K. Transparent conductors – A status review. *Thin Solid Films*. 1983;102: 1–46. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(83\)90256-0](https://doi.org/10.1016/0040-6090(83)90256-0)
2. Lee S. U., Choi W. S., Hong B. Synthesis and characterization of SnO_2 : Sb film by DC magnetron sputtering method for applications to transparent electrodes. *Physica Scripta*. 2007;129: 312–315. <https://doi.org/10.1088/0031-8949/2007/T129/069>
3. Niranjana R. S., Hwang Y. K., Kim D.-K., Jung S. H., Chang J.-S., Mulla I. S. Nanostructured tin oxide: Synthesis and gas-sensing properties. *Materials Chemistry and Physics*. 2005;92: 384–388. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2005.01.050>
4. Subramanian N. S., Santhi B., Sundareswaran S., Venkatakrisnan K. S. Studies on spray deposited SnO_2 , Pd: SnO_2 and F: SnO_2 thin films for gas sensor applications. *Synthesis and Reactivity in Inorganic, Metal-Organic, and Nano-Metal Chemistry*. 2006;36: 131–135. <https://doi.org/10.1080/15533170500478883>
5. 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>
6. Arthur J. R. Molecular beam epitaxy. *Surface Science*. 2002;500(1-3):189–217. [https://doi.org/10.1016/S0039-6028\(01\)01525-4](https://doi.org/10.1016/S0039-6028(01)01525-4)
7. Wang T., Prakash A., Warner E., Gladfelter W. L., Jalan B. Molecular beam epitaxy growth of SnO_2 using a tin chemical precursor. *Journal of Vacuum Science & Technology A*. 2015;33(2): 020606-1-4. <http://doi.org/10.1116/1.4913294>
8. Rosental A., Tarre A., Gerst A., ... Uustare T. Epitaxial single and double nanolayers of SnO_2 and TiO_2 for resistive gas sensors. *IEEE Sensors Journal*. 2013;13(5): 1648–1655. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2013.2238227>
9. Gangwar A. K., Godiwal R., Jaiswal J., ... Singh P. Magnetron configurations dependent surface properties of SnO_2 thin films deposited by sputtering process. *Vacuum*. 2020;177: 109353-1-9. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109353>
10. Nguyen T. T., Dang H. P., Luc Q. H., Le T. Studying the influence of deposition temperature and nitrogen contents on the structural, optical, and electrical properties of N-doped SnO_2 films prepared by direct current magnetron sputtering. *Ceramics International*. 2019;45: 9147–9156. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.01.255>
11. 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>

12. Brown F. C., Rustgi O. P. Extreme ultraviolet transmission of crystalline and amorphous silicon. *Physical Review Letters*. 1972;28: 497–500. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.28.497>

13. Barranco A., Yubero F., Espinos J. P., Groening P., Gonzalez-Eliphe A. R. Electronic state characterization of SiO_x thin films prepared by evaporation. *Journal of Applied Physics*. 2005;97: 113714. <https://doi.org/10.1063/1.1927278>

14. Turishchev S. Yu., Parinova E. V., Pisliaruk A. K., ... Sivakov V. Surface deep profile synchrotron studies of mechanically modified top-down silicon nanowires array using ultrasoft X-ray absorption near edge structure spectroscopy. *Scientific Reports*. 2019;9(8066): 1–7. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44555-y>

15. Koyuda D. A., Titova S. S., Tsurikova U. A., ... Turishchev S. Yu. Composition and electronic structure of porous silicon nanoparticles after oxidation under air- or freeze-drying conditions. *Materials Letters*. 2022;312: 131608-1-3. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.131608>

16. Ming T., Turishchev S., Schleusener A., ... Sivakov V. Silicon suboxides as driving force for efficient light-enhanced hydrogen generation on silicon nanowires. *Small*. 2021;19: 2007650-1-6. <https://doi.org/10.1002/sml.202007650>

17. Kucheyev S., Baumann T. F., Sterne P. A., ... Willey T. M. Surface electronic states in three-dimensional SnO₂ nanostructures. *Physical Review B*. 2005;72(3): 035404-1-5. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.72.035404>

18. Sharma A., Varshney M., Shin H. J., Chae K. H., Won S. O. X-ray absorption spectroscopy investigations on electronic structure and luminescence properties of Eu:SnO₂-SnO nanocomposites. *Current Applied Physics*. 2016;16: 1342–1348. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cap.2016.08.005>

19. 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>

20. Manyakin M. D., Kurganskii S. I., Dubrovskii O. I., ... Turishchev S. Yu. Electronic and atomic structure studies of tin oxide layers using X-ray absorption near edge structure spectroscopy data modelling. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2019;99: 28–33. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2019.04.006>

21. Domashevskaya E. P., Yurakov Yu. A., Ryabtsev S. V., Chuvenkova O. A., Kashkarov V. M., Turish-

chev S. Yu. Synchrotron investigations of the initial stage of tin nanolayers oxidation. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*. 2007;156–158: 340–343. <http://doi.org/10.1016/j.elspec.2006.11.042>

22. Stohr J. *NEXAFS spectroscopy*. Berlin: Springer; 1996. 403 p.

23. 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)

24. Lebedev A. M., Menshikov K. A., Nazin V. G., Stankevich V. G., Tsetlin M. B., Chumakov R. G. NanoPES 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>

25. Kasrai M., Lennard W. N., Brunner R. W., Bancroft G. M., Bardwell J. A., Tan K. H. Sampling depth of total electron and fluorescence measurements in Si L- and K-edge absorption spectroscopy. *Applied Surface Science*. 1996;99: 303–312. [https://doi.org/10.1016/0169-4332\(96\)00454-0](https://doi.org/10.1016/0169-4332(96)00454-0)

26. Erbil A., Cargill III G. S., Frahm R., Boehme R. F. Total-electron-yield current measurements for near-surface extended x-ray-absorption fine structure. *Physical Review B*. 1988;37: 2450–2464. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.37.2450>

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, вед. 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/0000-0001-7635-8162>
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

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 01.09.2023; одобрена после рецензирования 08.11.2023; принята к публикации 10.11.2023; опубликована онлайн 25.03.2024.