



Краткие сообщения

Краткое сообщение

УДК 538.9

Научная специальность ВАК -1.3.8. Физика конденсированного состояния

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/13201>

Синхротронные XANES исследования нанослоев эпитаксиальных твердых растворов олово-кремний

Н. И. Бойков¹, О. А. Чувенкова¹, Е. В. Парина¹, Р. Г. Чумаков², А. М. Лебедев², А. Макарова³, Д. Смирнов⁴, С. С. Титова¹, К. А. Фатеев¹, С. Ю. Турищев¹✉

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»,
Университетская пл., 1, Воронеж 394018, Российская Федерация

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
пл. Академика Курчатова, 1, Москва, 123182, Российская Федерация

³Free University of Berlin,
Arnimallee 22, 14195 Berlin, Germany

⁴Dresden University of Technology,
Zellescher Weg 18, 01069 Dresden, Germany

Аннотация

Цель работы: Функциональные материалы на основе олова и кремния, тонкопленочные структуры на их основе являются перспективными для применения в приборах и устройствах микроэлектроники. Важным вопросом для изучения и последующего применения таких материалов и структур является управление свойствами при вариации технологических режимов формирования.

Экспериментальная часть: В работе методом спектроскопии ближней тонкой структуры края рентгеновского поглощения с применением синхротронного излучения исследованы специфика локального атомного окружения и особенности электронного строения твердых растворов олово-кремний. Нанослоистые структуры твердых растворов олово-кремний на буферных нанослоях кремния формировались с использованием молекулярно-лучевой эпитаксии.

Выводы: Показана возможность формирования эпитаксиального твердого раствора олово-кремний в области концентраций, значительно превышающей известные пределы растворимости Sn в Si. Перестройка локальной плотности электронных состояний олова и кремния указывает на формирование твердых растворов с концентрациями олова 2, 8 и 15 ат. %.

Ключевые слова: олово, кремний, оксиды олова и кремния, электронное строение, плотность состояний, локальное атомное окружение, состав, эпитаксиальные твердые растворы, ближняя тонкая структура краев рентгеновского поглощения, синхротронные исследования

Источник финансирования:

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

Благодарности: Авторы благодарят А. Тонких за предоставленные образцы.

Для цитирования: Бойков Н. И., Чувенкова О. А., Парина Е. В., Чумаков Р. Г., Лебедев А. М., Макарова А., Смирнов Д., Титова С. С., Фатеев К. А., Турищев С. Ю. Синхротронные XANES исследования нанослоев эпитаксиальных твердых растворов олово-кремний. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2025;27(3): 490–496. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/13201>

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

© Бойков Н. И., Чувенкова О. А., Парина Е. В., Чумаков Р. Г., Лебедев А. М., Макарова А., Смирнов Д., Титова С. С., Фатеев К. А., Турищев С. Ю., 2025



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

For citation: Boikov N. I., Chuvenkova O. A., Parinova E. V., Chumakov R. G., Lebedev A. M., Makarova A., Smirnov D., Titova S. S., Fateev K. A., Turishchev S. Yu. Synchrotron XANES studies of epitaxial tin-silicon solid solutions nanolayers. *Condensed Matter and Interphases*. 2025;27(3): 490–496. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/13201>

1. Введение

Формирование новых перспективных функциональных материалов с новыми свойствами и характеристиками для создания на их основе современных приборов является актуальной задачей. Создание твердых растворов на основе кремния, самого распространенного и широко применяемого материала в приборах и устройствах микроэлектроники, является перспективным способом достижения новых свойств формируемых структур. Внедрение, например, атомов олова в кристаллическую решетку кремния может привести к изменению оптических свойств, процессов генерации, рекомбинации и переноса носителей заряда в полученных объектах [1, 2]. Варьирование концентрации внедренных атомов олова может позволить управлять свойствами материала, которые отражаются на электронной структуре, оптических и электрофизических свойствах твердых растворов. Получение однородных твердых растворов олово-кремний возможно при применении неравновесных методов роста таких как молекулярно-лучевая эпитаксия, ввиду большого различия в параметрах решеток структур на основе этих атомов и их низкой взаимной растворимости [1]. Вышеперечисленное делает твердые растворы $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$ подходящими для создания устройств электроники, в частности, различных термоэлектрических приборов, оптоэлектронных устройств, таких как лазеры и светодиоды. В настоящей работе приводятся результаты изучения специфики электронного строения нанослоев эпитаксиальных твердых растворов $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$, выращенных на буферных слоях и подложках кристаллического кремния с концентрациями превышающими пределы растворимости олова в кремнии ($x > 0.1$ ат. %) [3]. Исследования проводились неразрушающим, чувствительным к локальному окружению атомов поверхности методом спектроскопии ближней тонкой структуры края рентгеновского поглощения (XANES – X-ray absorption near edge structure) с применением высокоинтенсивного синхротронного излучения [4–6].

2. Экспериментальная часть

Исследованные образцы, которые мы обозначим как «SiSn», были получены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке Si (001) с 20 нм буферным слоем Si [7]. При фор-

мировании образцов очищенные и высушенные подложки транспортировались в сверхвысоковакуумную камеру для выращивания пленок, где производилась десорбция термического оксида при температуре 840 °С. Затем на буферный слой кремния толщиной 20 нм одновременно осаждались атомы кремния (~98, 92 и 85 ат. %) и олова (~ 2, 8 и 15 ат. %), источниками которых выступали электронно-лучевой испаритель (Si) и эффузионная ячейка (Sn). Толщина осажденного слоя SiSn составила порядка 5 нм. В результате были получены следующие образцы $\text{Si}_{0.98}\text{Sn}_{0.02}$, $\text{Si}_{0.92}\text{Sn}_{0.08}$ и $\text{Si}_{0.85}\text{Sn}_{0.15}$. Перед проведением синхротронных экспериментов образцы хранились в лабораторных условиях несколько недель.

Исследования электронного строения образцов были проведены неразрушающим методом XANES, который позволяет получить информацию о специфике локального окружения поглощающих атомов кремния, олова и кислорода и эффектах упорядочения в структурной сетке этих атомов анализируемого поверхностного слоя [8]. Метод XANES позволяет получить прямую экспериментальную информацию о распределении локальной парциальной плотности свободных электронных состояний в зоне проводимости изучаемого слоя поверхности [4–6, 9–11]. Использовалось высокоинтенсивное излучение ультрамягкого рентгеновского диапазона синхротронов BESSY-II, Российско-Немецкий канал (Гельмгольц Центр Берлин, Берлин, Германия) [12] и КИСИ-Курчатов, канал НАНОФЭС (НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия) [13]. Поток фотонов составлял 10^9 – 10^{11} фотонов/с, ток накопителя 50–300 мА. Глубина анализируемого слоя поверхности [14, 15] и энергетическое разрешение для краев Si $L_{2,3}$, Sn $M_{4,5}$ и O K составляли ~5 нм для кремния, ~10 нм для олова и кислорода 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 образца.

3. Результаты и обсуждение

XANES Si $L_{2,3}$ (2p) спектры поглощения представляют собой s состояний в зоне проводимости, которые отражают переходы с основных $2p$ состояний на свободные s и d

состояния в зоне проводимости. На рис. 1 представлены спектры XANES $\text{Si } L_{2,3}$ эталонных материалов (монокристаллического кремния c-Si, аморфного кремния a-Si, термически выращенного оксида кремния SiO_2 и эпитаксиального буферного слоя c-Si Buffer на кремнии) и исследуемых образцов эпитаксиальных твердых растворов $\text{Si}_{0.98}\text{Sn}_{0.02}$, $\text{Si}_{0.92}\text{Sn}_{0.08}$ и $\text{Si}_{0.85}\text{Sn}_{0.15}$. Анализ полученных спектров показывает, что эпитаксиальный буферный слой кремния (c-Si Buffer) имеет четко выраженную тонкую структуру с двумя парами особенностей, соответствующий спиндублетному расщеплению возбуждаемого $L_{2,3}$ уровня кремния в 0.6 эВ, в диапазоне энергий квантов синхротронного излучения 100–104 эВ, характерную для эталона монокристаллического кремния (c-Si). Отметим, что в указанной области спектр эталона a-Si имеет более простую тонкую структуру без отмеченных выше парных

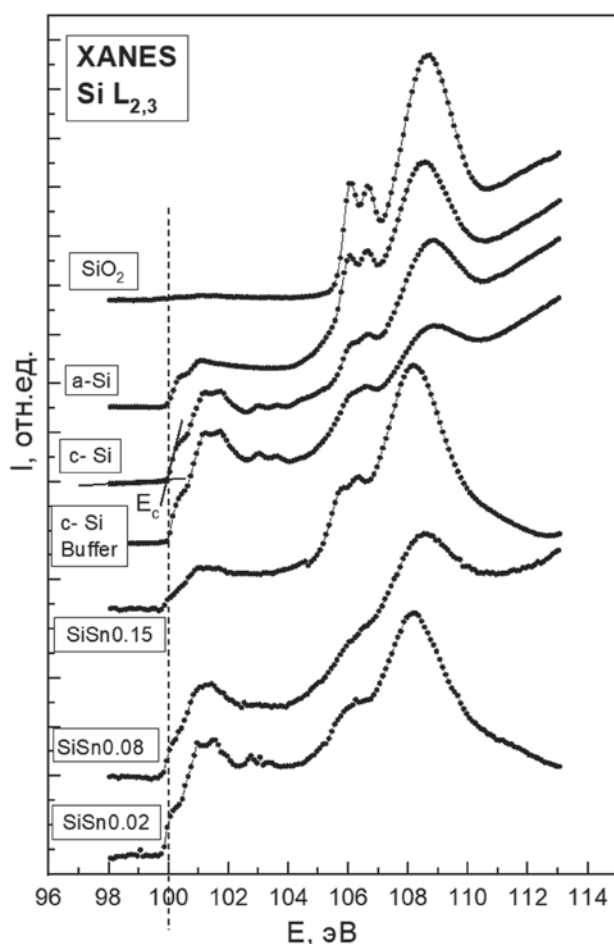


Рис. 1. XANES $\text{Si } L_{2,3}$ эталонных образцов кристаллического кремния (c-Si), аморфного кремния (a-Si), оксида кремния (SiO_2), буферного слоя c-Si (c-Si Buffer) и эпитаксиальных твердых растворов $\text{SiSn}_{0.02}$, $\text{SiSn}_{0.08}$, $\text{SiSn}_{0.15}$

максимумов, в силу размытия плотности электронных состояний аморфного кремния. Край поглощения и следующая за ним тонкая структура XANES $\text{Si } L_{2,3}$ для SiO_2 расположены выше энергий в 104 эВ, схожие особенности можно обнаружить и для спектров эталонов c-Si и a-Si, так как они покрыты естественным оксидом.

Тонкая структура спектров XANES $\text{Si } L_{2,3}$ образцов исследуемых эпитаксиальных твердых растворов имеет ряд особенностей (рис. 1). Так, в твердом растворе с количеством атомов олова 2 % $\text{Si}_{0.98}\text{Sn}_{0.02}$ тонкая структура XANES спектра в области поглощения элементарного кремния ($100 \text{ эВ} < h\nu < 104 \text{ эВ}$) хорошо выражена и соответствует кристаллическому кремнию (рис. 1). А в области оксида кремния 105–112 эВ характерные особенности тонкой структуры спектра не наблюдаются. Здесь тонкая структура в целом размыта, основной пик при энергиях $\sim 108 \text{ эВ}$ уширен и сдвинут в сторону меньших значений, что может говорить о недоокисленном состоянии атомов кремния поверхности образца [10, 16]. В твердом растворе с большим содержанием олова 8 % $\text{Si}_{0.92}\text{Sn}_{0.08}$ тонкая структура спектра в области элементарного кремния несколько размывается, что может говорить о небольшом отклонении от упорядочения в решетке атомов кремния. Тонкая структура в области оксидов кремния остается, в целом, столь же невыраженной, как и в случае твердого раствора с 2 % содержанием олова $\text{Si}_{0.98}\text{Sn}_{0.02}$. С увеличением содержания олова до 15 % $\text{Si}_{0.85}\text{Sn}_{0.15}$ тонкая структура спектра XANES $\text{Si } L_{2,3}$ в области элементарного кремния становится еще более размытой. Однако ширина характерных особенностей тонкой структуры в этой части спектров XANES $\text{Si } L_{2,3}$ для $\text{Si}_{0.85}\text{Sn}_{0.15}$ и их общий вид отличны от характерного бесструктурного края поглощения эталона аморфного кремния. В области оксида кремния тонкая структура становится более выраженной и соответствует таковой для естественного оксида, покрывающего кристаллический кремний c-Si (рис. 1). Это говорит о возможных и еще более заметных, чем при меньшем содержании олова в твердом растворе, искажениях в решетке атомов кремния и при этом большем окислении атомов кремния с поверхности. Наконец для всех нанослоев твердых растворов отмечен небольшой сдвиг положения края поглощения при 99.9 эВ, для эталона c-Si, в сторону меньших энергий.

Таким образом, можно заключить, что по мере увеличения количества атомов олова в

твердых растворах SiSn происходит изменение тонкой структуры $\text{Si L}_{2,3}$ спектров поглощения. С увеличением концентрации атомов олова в нанослое твердого раствора происходит сглаживание тонкой структуры спектра, то есть распределения плотности свободных электронных состояний в зоне проводимости [8, 10]. В области края поглощения элементарного кремния, соответствующего положению дна зоны проводимости относительно возбуждаемого остоного уровня ($\text{Si L}_{2,3}$), происходит «затягивание» электронных состояний в запрещенную зону по сравнению с данными по тонкой структуре спектра кристаллического кремния и положению E_c (рис. 1). Порядок в структурной сетке атомов кремния в целом претерпевает некоторые искажения. То есть, механические напряжения, вероятно, возникающие при формировании нанослоев твердых растворов, приводят к искажению в электронном строении этих нанослоев. В том числе, формирующегося при хранении в лабораторных условиях естественного оксида кремния. Наблюдаемое общее сглаживание тонкой структуры спектров XANES $\text{Si L}_{2,3}$ может происходить в результате внедрения атомов олова в решетку атомов кремния при формировании нанослоя твердого раствора.

На рис. 2 представлены спектры XANES $\text{Sn M}_{4,5}$ эталонных материалов (экспериментально полученные для тетрагонального $\text{SnO}_2(\text{T})$, металлической фольги без естественного оксида Sn foil refresh, металлической фольги олова Sn foil с естественным оксидом [4-6] и *ab-initio* рассчитанные для орторомбического $\text{SnO}_2(\text{O})$ и тетрагонального SnO [11]) и исследуемых образцов эпитаксиальных твердых растворов $\text{Si}_{0.98}\text{Sn}_{0.02}$, $\text{Si}_{0.92}\text{Sn}_{0.08}$ и $\text{Si}_{0.85}\text{Sn}_{0.15}$. XANES $\text{Sn M}_{4,5}$ ($3d$) спектры поглощения представляют собой распределение p состояний в зоне проводимости, которые отражают переходы с остоных $3d$ состояний на свободные p и f состояния в зоне проводимости. Подробное обсуждение тонкой структуры эталонных спектров изложено в работах [4-6, 11]. Стоит лишь отметить, что распределение основных спектральных особенностей и их относительных интенсивностей (рис. 2) XANES $\text{Sn M}_{4,5}$ показывают существенное отличие для эталонов каждого соединения системы олово-кислород. Тонкая структура исследуемых твердых растворов достаточно схожа между собой по наблюдаемым спектральным особенностям при энергиях 487, 493, 497 эВ, соответствующих M5 краю поглощения в олове. В целом тонкая струк-

тура XANES $\text{Sn M}_{4,5}$ исследуемых твердых растворов по наличию и расположению характерных пиков, их относительной интенсивности, представляет собой совокупность вкладов орторомбического $\text{SnO}_2(\text{O})$, монооксида олова SnO и тетрагонального $\text{SnO}_2(\text{T})$ с заметным количеством вакансий по кислороду. При этом наблюдается перераспределение в интенсивностях указанных выше особенностей. Так, с увеличением концентрации олова в твердых растворах увеличивается интенсивность двойного пика при энергии ~ 488 эВ (края M5), связываемого с недостатком атомов в кислородной подрешетке оксида олова [4, 5] и его высокоэнергетической составляющей, при энергии ~ 495 эВ. Также стоит отметить, что с увеличением концентрации олова становятся все более наглядными изменения в предкраевой области спектра, а именно, образуется небольшое плечо со стороны дна зоны проводимости в сторону меньших энергий. Это может говорить о наличии дополнительных электронных состоя-

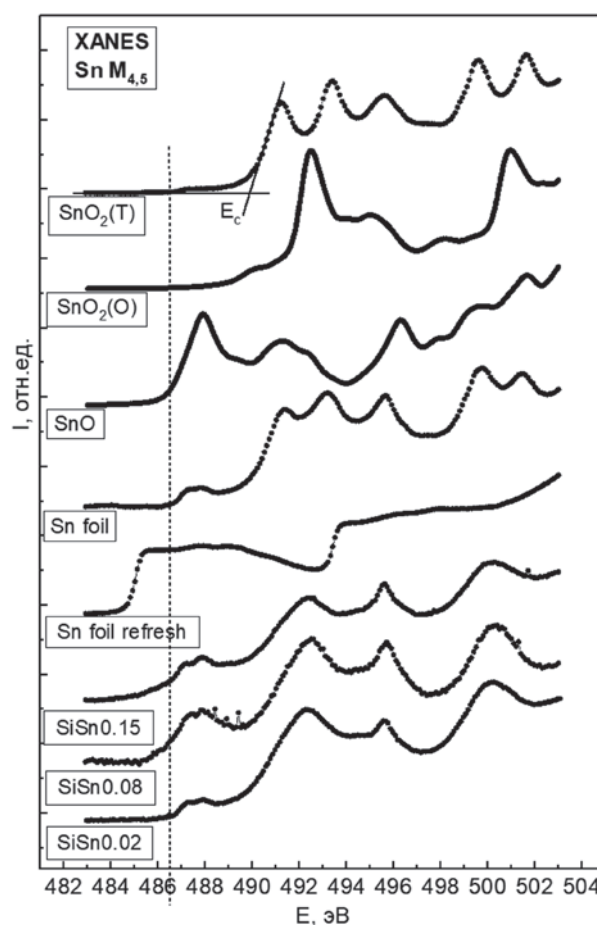


Рис. 2. XANES $\text{Sn M}_{4,5}$ эталонных образцов $\text{SnO}_2(\text{T})$, $\text{SnO}_2(\text{O})$, SnO, Sn foil, Sn foil refresh и эпитаксиальных твердых растворов SiSn0.02, SiSn0.08, SiSn0.15

ний в запрещенной зоне у дна зоны проводимости. Таким образом, можно заключить, что увеличение концентрации атомов олова в твердых растворах SiSn приводит к изменению тонкой структуры края поглощения олова вблизи дна зоны проводимости при стабильном состоянии ближайшего окружения атомов олова. Сделанные наблюдения говорят о формировании стабильного набора соединений олова в исследуемых нанослоях твердых растворов. Наблюдается хорошая корреляция с данными для краев поглощения кремния, где также наблюдалось «затягивание» электронных состояний вблизи E_c . Тем самым наблюдаются эффекты изменения в электронном строении нанослоев твердых растворов SiSn как следствие нарушений в локальном окружении атомов Si при встраивании в их решетку атомов Sn и перераспределения кислорода при естественном окислении поверхности сформированных нанослоев твердых растворов с недостатком кислорода для атомов олова.

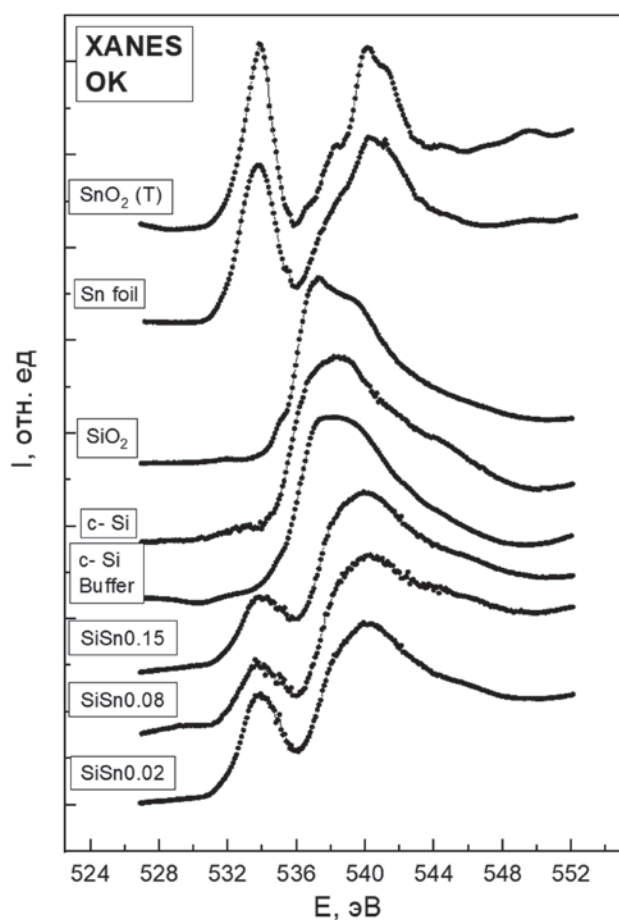


Рис. 3. XANES O K эталонных образцов $\text{SnO}_2(\text{T})$, Sn foil, c-Si, SiO_2 и эпитаксиальных твердых растворов SiSn0.02, SiSn0.08, SiSn0.15

На рис. 3 представлены O K спектры XANES эталонных ($\text{SnO}_2(\text{T})$, Sn foil, c-Si (естественный оксид), SiO_2 и c-Si Buffer (естественный оксид)) и исследуемых образцов эпитаксиальных твердых растворов $\text{Si}_{0.98}\text{Sn}_{0.02}$, $\text{Si}_{0.92}\text{Sn}_{0.08}$ и $\text{Si}_{0.85}\text{Sn}_{0.15}$. XANES O K (1s) спектры поглощения представляют собой результат переходов с основного 1s уровня кислорода на свободные p состояния в зоне проводимости. Видно, что спектры представленных эталонных образцов отличаются между собой по тонкой структуре. Так, диоксид олова тетрагональной модификации имеет выраженные пики при энергии 533.9 и 540.2 эВ, а также особенности при 536–549 эВ. В металлической фольге олова наиболее ярко выражены основные пики при тех же энергиях, а остальные особенности тонкой структуры сглажены. Спектры для c-Si (естественный оксид), SiO_2 и c-Si Buffer (естественный оксид) схожи между собой и имеют широкий пик в интервале энергий 537–539 эВ. Отличие состоит в более выраженной ступени при энергии 535 эВ и ярко выраженном пике при энергии 537.3 эВ у SiO_2 . 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 краев поглощения кислорода O K (рис. 3) в исследуемых твердых растворах видно, что тонкая структура спектров состоит из двух особенностей при энергиях 533.9 эВ и в интервале энергий 537–539 эВ, что соответствует особенностям оксидов олова и оксидов кремния соответственно. Между собой спектры твердых растворов отличаются небольшим перераспределением интенсивностей указанных пиков. Таким образом, тонкая структура края поглощения кислорода в исследуемых образцах говорит о преимущественном окислении атомов более электроотрицательного кремния, тем не менее оксиды олова вносят вклад в электронный спектр нанослоев твердых растворов олово-кремний.

4. Выводы

Наблюдается общее согласие данных по результатам анализа синхротронных спектров XANES кремния ($\text{Si L}_{2,3}$), олова ($\text{Sn M}_{4,5}$) и кислорода (O K) для твердых растворов олово-кремний, сформированных методом молекулярно-лучевой эпитаксии с превышением известных пределов растворимости Sn в Si (2, 8 и 15 %) в виде тонких нанослоев на буферном слое кри-

сталлического кремния. Показано, что даже наименьшая концентрация атомов олова 2 % при формировании твердого раствора SiSn вносит изменения в специфику ближайшего окружения атомов Si и Sn. Появление атомов олова в окружении атомов кремния при образовании твердого раствора приводит к проявлению эффекта «затягивания» электронных состояний в запрещенную зону вблизи E_c . При хранении структур в лабораторных условиях на поверхности формируются естественные и промежуточные оксиды кремния и олова. Увеличение содержания олова (до 15 %) приводит к размытию плотности электронных состояний вблизи дна зоны проводимости.

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. Soref R. A., Perry C. H. Predicted band gap of the new semiconductor SiGeSn. *Journal Applied Physics*. 1991;69: 539–548. <https://doi.org/10.1063/1.347704>
2. Moontragoon P., Ikonik Z., Harrison P. Band structure calculations of Si–Ge–Sn alloys: achieving direct band gap materials. *Semiconductor Science and Technology*. 2007;22: 742–748. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/22/7/012>
3. Massalski T. B., Okamoto H., Subramanian P. R., Kacprzak L. *Binary Alloy Phase Diagrams*. 2nd ed., 1990, vol. 2, ASM International, Materials Park, Ohio, p. 3362.
4. Chuvankova 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>
5. 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>
6. Чувенкова О. А., Бойков Н. И., Рябцев С. В., ... 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>
7. 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>
8. Stohr J. *NEXAFS spectroscopy*. Berlin: Springer: 1996. 403 p.
9. 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>
10. Ming T., Turishchev S., Schleusener A., ... Sivakov V. Silicon suboxides as driving force for efficient light-enhanced hydrogen generation on silicon nanowires. *Small*. 2021;17(8): 2007650-1-6. <https://doi.org/10.1002/sml.202007650>
11. 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>
12. 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)
13. 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>
14. 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)
15. 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>
16. Barranco A., Yubero F., Espinos J. P., Groening P., Gonzalez-Elipe A. R. Electronic state characterization of SiOx thin films prepared by evaporation. *Journal of Applied Physics*. 2005;97: 113714. <https://doi.org/10.1063/1.1927278>

Информация об авторах

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

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

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 16.10.2024; одобрена после рецензирования 18.11.2024; принята к публикации 18.11.2024; опубликована онлайн 25.09.2025.