

Исследование структурных и электрических свойств реконструированной поверхности Si(111) после адсорбции лития

© Д.А. Цуканов,^{1,2} М.В. Рыжкова¹

¹Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН,
690041 Владивосток, Россия

²Дальневосточный федеральный университет,
690090 Владивосток, Россия
e-mail: tsukanov@iacp.dvo.ru

Поступило в Редакцию 6 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 6 апреля 2022 г.

Принято к публикации 6 апреля 2022 г.

Представлены результаты исследования кристаллической структуры и поверхностной проводимости подложки кремния Si(111) с реконструированной поверхностью после напыления субмонослойных доз лития. Использован метод дифракции медленных электронов для исследования изменений структуры кристаллической решетки поверхности, а также четырехзондовый метод для измерения проводимости подложек в условиях *in situ*. В качестве исходных реконструкций была использована реконструкция Si(111)7 × 7 атомарно-чистой подложки кремния, а также реконструкции, полученные адсорбцией 1 ML атомов золота, свинца и висмута: Si(111)β-√3 × √3-Au, Si(111)1 × 1-Pb и Si(111)β-√3 × √3-Bi соответственно.

Ключевые слова: кремний, адсорбция, поверхностная реконструкция, поверхностная проводимость, дифракция медленных электронов.

DOI: 10.21883/JTF.2022.08.52788.83-22

Введение

В последнее время наблюдается повышенный интерес к исследованию структурных и электрических свойств пленок лития, а также его сплавов на кремнии, что обусловлено их потенциальным использованием в качестве элементов для литий-ионных батарей [1]. В принципе исследования пленок щелочных металлов, в том числе и лития на поверхности кремния проводятся достаточно давно [2–5]. Уже известно, что на атомарно-чистой поверхности кремния Si(111) осаждение субмонослойных покрытий лития или других щелочных металлов приводит к формированию упорядоченных реконструкций: 3 × 1, 6 × 1, 1 × 1 и др. [5]. Однако в последнее время был обнаружен ряд явлений, которые позволяют обратить внимание на использование щелочных металлов в качестве материала для адсорбции на поверхности с атомными реконструкциями. Одной из интересных особенностей взаимодействия щелочных металлов с реконструированной поверхностью Si(111)√3 × √3-Au является формирование гомогенной поверхности и появление металлических поверхностных состояний в запрещенной зоне [6]. С другой стороны, установлено, что взаимодействие натрия с поверхностью атомарно-чистого кремния Si(111)7 × 7 приводит к исчезновению металлических состояний и сдвигу изгиба зон на 60 meV выше уровня Ферми [7].

В настоящей работе ставится задача изучить влияние адсорбции атомов лития на структуру и свойства, в частности, электропроводность, образцов крем-

ния с реконструированной поверхностью. В качестве реконструкций, на которые проводилось осаждение лития, были выбраны системы Si(111)β√3 × √3-Au, Si(111)β√3 × √3-Bi и Si(111)1 × 1-Pb. Например, в последней, Si(111)1 × 1-Pb, атомы свинца образуют упорядоченную сверхрешетку на монокристаллической поверхности, отсутствует диффузия атомов свинца в объем подложки и нет химической реакции с атомами кремния (отсутствует силицидообразование) [8]. В принципе субмонослойную систему Pb/Si(111) можно рассматривать как модельную систему неакционноспособной границы раздела. Кроме того, в последнее время данная система представляет интерес с точки зрения образования двумерных сплавов на основе свинца с такими элементами как золото [9], таллий [10], висмут [11] и др. Было показано, что данные системы демонстрируют целый набор многообещающих свойств, такие как спиновое расщепление, сверхпроводимость и прочее. Поверхность Si(111)β√3 × √3-Au содержит частично заполненные металлические поверхностные состояния, но при этом она обладает запрещенной зоной шириной 50 meV, а также имеется сильный изгиб зон в области пространственного заряда вблизи поверхности [12]. Таким образом, данная фаза представляет поверхность с обогащенными носителями приповерхностным слоем со слабо заполненными металлическими поверхностными состояниями. Более того, для данной поверхности характерно наличие большого количества дефектов в виде доменных стенок, вызванных напряженностью верхнего атомного слоя, которое можно снять дополнительным

напылением небольшого числа атомов, например, индия, таллия, а также щелочных металлов, натрия и цезия, в результате чего формируется бездефектная гомогенная поверхность типа $\text{Si}(111)h-\sqrt{3} \times \sqrt{3}-\text{Au,A}$, где в качестве компонента А могут использоваться адсорбированные атомы In, Tl, Na, Cs [6]. Поверхностная реконструкция $\text{Si}(111)\beta\sqrt{3} \times \sqrt{3}-\text{Bi}$ содержит 1 монослой (ML) атомов висмута, но в отличие от фазы $\text{Si}(111)1 \times 1-\text{Pb}$ имеет полупроводниковый характер зонной структуры, а также для данной фазы ранее был обнаружен эффект спинового расщепления рашбовского типа [13]. Однако для практического использования спинового транспорта для данной системы необходимо повысить его электропроводность, добавляя носители заряда в незаполненные спин-расщепленные состояния, что ранее было продемонстрировано при осаждении натрия на данную поверхность [14,15].

В настоящей работе представлены результаты исследования реконструированной поверхности кремния после осаждения на нее атомов лития. Особенностью работы является использование метода дифракции медленных электронов для наблюдения кристаллической структуры поверхности, а также измерения поверхностной проводимости полученных структур в сверхвысоком вакууме сразу после формирования сверхтонких пленок без выноса образцов на воздух.

1. Условия эксперимента

Для проведения исследований в настоящей работе была использована сверхвысоковакуумная камера RIBER DEL-300 с рабочим давлением $\sim 10^{-10}$ Торг. Установка оснащена дифрактометром медленных электронов (ДМЭ) фирмы Omicron Nanotechnology и четырехзондовой головкой для проведения электрических измерений. Головка размещена на выдвинутом манипуляторе, вольфрамовые зонды расположены по углам квадрата с межзондовым расстоянием 0.6 мм. В качестве измерителей использовались прецизионный источник постоянного и переменного тока Keithley 6221 с низким уровнем шума и нановольтметр Keithley 2182A, которые в режиме дельта-системы обеспечивают надежную и воспроизводимую характеризацию исследуемых материалов за счет разделения измерений тока и напряжения. Измерения поверхностной проводимости образцов проводились в стабильных условиях в сверхвысоком вакууме и при комнатной температуре. В качестве единицы измерения поверхностной проводимости использовалась величина $\sigma = I/U$ [S], где I и U — непосредственно измеренные в эксперименте значения тока (от 5 до $50 \mu\text{A}$) и напряжения соответственно при пропускании постоянного тока поочередно через четыре пары зондов с дальнейшим усреднением результатов измерений.

В качестве образцов использовались прямоугольные пластины кремния размером $15 \times 5 \times 0.45 \text{ mm}^3$, легированные фосфором, с удельным сопротивлением

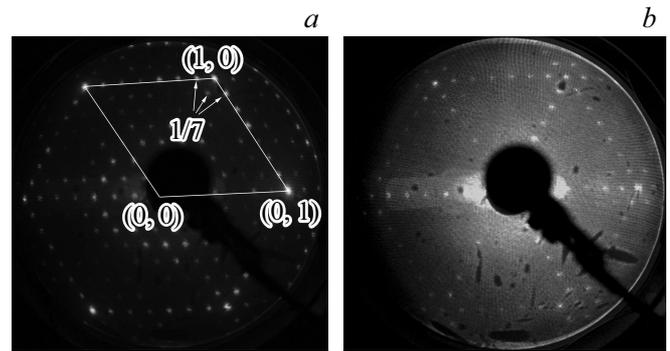


Рис. 1. Картины ДМЭ атомарно-чистой поверхности подложки $\text{Si}(111)7 \times 7$ (a) и поверхности $\text{Si}(111)\delta(7 \times 7)$, полученной после напыления 1 ML лития при комнатной температуре (b). Энергия первичного пучка 40 eV.

300–1700 $\Omega\cdot\text{cm}$. Очистка поверхности образца проводилась сначала путем промывания и очистки в органических растворителях, сушки. Далее образцы помещались в сверхвысоковакуумную камеру, где сначала проводилась их дегазация при температуре до 600°C в течение нескольких часов путем пропускания переменного тока, а затем осуществлялся кратковременный нагрев (вспышка) до температуры 1250°C . Подготовленные таким образом образцы демонстрировали четкую картину дифракции 7×7 (рис. 1, a), характерную для атомарно-чистой поверхности кремния.

В настоящей работе были использованы следующие источники адсорбируемых материалов: свинец и висмут напыляли из танталовых трубочек, золото испаряли из вольфрамовой корзинки, в качестве источника лития использовался геттерный диспенсер фирмы SAES Getters. Скорость осаждения адсорбированного материала калибровалась с помощью ДМЭ по картинам дифракции от реконструированной поверхности с известным числом атомов (1 ML покрытия адсорбата соответствует концентрации атомов $7.8 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ для нереконструированной поверхности $\text{Si}(111)$). Ошибку в покрытии адсорбатов, откалиброванную таким способом, можно оценить как $\pm 0.05 \text{ ML}$. Для испарения фуллерена использовалась ячейка Кнудсена, нагреваемая постоянным током. Скорость осаждения фуллерена составляла $\sim 0.1 \text{ ML}$ в минуту и была определена путем осаждения C_{60} на поверхность $\text{Si}(111)-\alpha\sqrt{3} \times \sqrt{3}-\text{Au}$ с образованием фуллеритоподобной решетки (1 ML соответствует концентрации молекул фуллерена $1.15 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ [16].

2. Результаты экспериментов и их обсуждение

Эксперимент по изучению адсорбции лития проводился сначала на атомарно-чистой поверхности кремния $\text{Si}(111)7 \times 7$ с целью выяснения влияния атомов лития на электропроводность кремниевой подложки. Известно,

что адсорбция лития при комнатной температуре приводит на начальной стадии напыления к кластеризации атомов Li [17], что на картине ДМЭ проявляется в виде постепенного затухания сверхрефлексов 7×7 , а затем при покрытии лития около 1 ML формируется картина ДМЭ, которую обычно указывают как $\delta(7 \times 7)$ [18], где сверхрефлексы порядка $1/7$ остаются лишь вблизи основных рефлексов 1×1 , а также на линии между этими рефлексами (рис. 1, *b*). Такое поведение картин ДМЭ объясняется в работе [19] тем, что адсорбированные атомы лития собираются в кластеры внутри ячеек со структурой 7×7 , вытесняя адатомы кремния, в то время как угловые адатомы этих ячеек остаются нетронутыми до тех пор, пока не закончится формирование кластеров сначала из трех, затем шести атомов лития, а с дальнейшим увеличением концентрации атомов лития на поверхности подложки формируется неупорядоченный слой из атомов лития. При этом на поверхности происходит сильное снижение работы выхода, до -1.74 eV для поверхности с картиной дифракции $\delta(1 \times 7)$, когда покрытие лития составляет 1 ML [20]. Исследование поверхностной проводимости показало (рис. 2, *a*), что электропроводность образца после напыления лития изменяется слабо, наблюдается лишь небольшое снижение электропроводности на начальной стадии напыления. Подобное снижение проводимости ранее наблюдалось, например, после напыления натрия на подложку Si(111) 7×7 в работе [7] для подложек как *n*-типа ($1-10 \Omega \cdot \text{cm}$), так и *p*-типа ($3900-6400 \Omega \cdot \text{cm}$), причем изменения проводимости объяснялись как результат исчезновения металлических состояний на поверхности из-за разрушения упорядоченной структуры поверхности, а также из-за изгиба зон и связанного с этим понижением работы выхода, что является характерным явлением для щелочных металлов, адсорбированных на поверхности как полупроводников, так и металлических пленок [20–23]. В нашем случае небольшое снижение электропроводности наблюдается также примерно до покрытия адсорбированного лития около 0.1–0.2 ML, что вполне можно трактовать как наблюдение перехода металл–изолятор при комнатной температуре [24].

Одной из интересных особенностей при адсорбции щелочных металлов, а также индия и таллия на реконструированные поверхности Si(111) является способность формировать гомогенную поверхность из реконструкций, исходно обладающих большим количеством доменных стенок, к которым относятся Si(111) $\alpha-\sqrt{3} \times \sqrt{3}-\text{Au}$, Si(111) $\beta-\sqrt{3} \times \sqrt{3}-\text{Au}$ и Si(111) $6 \times 6-\text{Au}$ [6,25,26], при этом наблюдается заполнение металлических зон поверхностных состояний [27] и соответственно рост поверхностной проводимости [26,28]. Обнаружено, что и литий на данных реконструкциях ведет себя аналогично. Так, результаты эксперимента показывают, что осаждение около 0.15 ML лития на поверхность Si(111) $\beta-\sqrt{3} \times \sqrt{3}-\text{Au}$ при температуре 250°C также приводит к формированию гомогенной поверхности, что видно из картин ДМЭ на

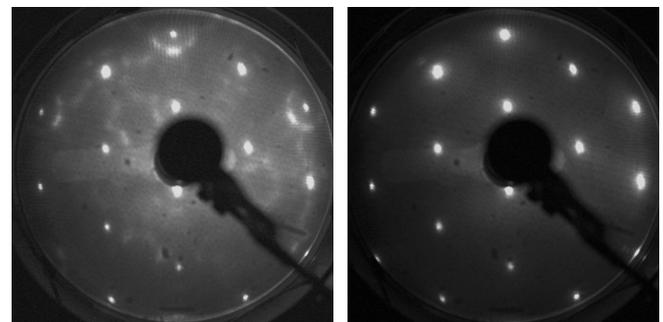
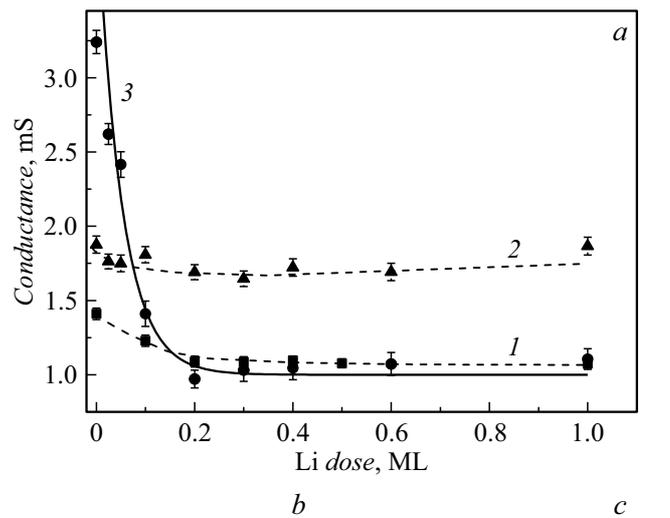


Рис. 2. Поверхностная проводимость образцов кремния после осаждения субмонослойных доз лития на поверхности Si(111) 7×7 (график 1), Si(111) $\beta\sqrt{3} \times \sqrt{3}-\text{Au}$ (график 2) и Si(111) $h\sqrt{3} \times \sqrt{3}-(\text{Au},\text{Li})$ (график 3, аппроксимация) при комнатной температуре (*a*). Картины ДМЭ для поверхности Si(111) $\beta\sqrt{3} \times \sqrt{3}-\text{Au}$ (*b*) и Si(111) $h\sqrt{3} \times \sqrt{3}-(\text{Au},\text{Li})$ (*c*). Энергия первичного пучка 40 eV.

рис. 2, *b* до напыления лития и на рис. 2, *c* после напыления лития. На рис. 2, *b* показана картина дифракции исходной поверхности Si(111) $\beta-\sqrt{3} \times \sqrt{3}-\text{Au}$, на которой, кроме рефлексов порядка $\sqrt{3}$ видны полосы, происхождение которых вызвано наличием большого количества доменных стенок на поверхности [29]. После осаждения лития на поверхность Si(111) $\beta-\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{Au}$, нагретую до 250°C , полосы на дифракционной картине исчезают, и остаются только четкие рефлексы $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ (рис. 2, *c*). Для данной поверхности, обозначенной как Si(111) $h-\sqrt{3} \times \sqrt{3}-(\text{Au},\text{Li})$ было измерено значение поверхностной проводимости, которое составило 3.24 ± 0.08 mS, что существенно выше, чем для исходной поверхности с фазой Si(111) $\beta-\sqrt{3} \times \sqrt{3}-\text{Au}$. Однако напыление лития при комнатной температуре на эти же поверхности приводит лишь к уменьшению электропроводности. На рис. 2, *a* показаны изменения проводимости после напыления лития на поверхность Si(111) $\beta-\sqrt{3} \times \sqrt{3}-\text{Au}$, а также на поверхность Si(111) $h-\sqrt{3} \times \sqrt{3}-(\text{Au},\text{Li})$, причем напыление в обоих случаях проводилось только при комнатной темпера-

туре. Видно, что проводимость уменьшается, картины дифракции при этом демонстрируют постепенное затухание рефлексов. Уменьшение проводимости можно описать функцией

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-D/D_0) + \sigma_S \quad [30],$$

где σ_0 — исходное значение проводимости подложки Si(111) $h-\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -(Au,Li), σ_S — проводимость чистой подложки, D — доза осажденного лития, D_0 — насыщающее покрытие адсорбированных атомов лития. Под насыщением в данном случае необходимо понимать количество адсорбированного лития, необходимого для полного удаления металлических поверхностных состояний фазы Si(111) $h-\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -(Au,Li), когда проводимость осуществляется лишь через объем подложки. На рис. 2, *a* сплошной линией показана аппроксимация изменений проводимости для поверхности Si(111) $h-\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -(Au,Li), причем наилучшим значением параметра D_0 является 0.25 ML.

Хорошо известно, что взаимодействие атомов щелочных металлов сильно проявляется при их адсорбции на металлические поверхности [31,32]. В эксперименте хорошо видна общая особенность — поверхностная проводимость уменьшается с увеличением дозы атомов лития на подложке. Так, на начальной стадии адсорбции атомы лития связываются с подложкой, передают ей заряд и становятся положительно заряженными ионами. В отличие от полупроводниковой поверхности оценка насыщающего покрытия для щелочных металлов на поверхности металлических пленок, например для цезия, находится в пределах от 0.4 (в случае с адсорбцией цезия на поверхность Au(111) [33]) до 0.33 ML (в аналогичном случае с адсорбцией цезия на Ag(111) [34]). Этот процесс сопровождается понижением электрической проводимости фазы до тех пор, пока не наступит насыщение проводимости поверхности после осаждения 0.2–0.3 ML лития.

На рис. 3, *a* показаны изменения проводимости после осаждения на реконструированную поверхность Si(111)1 \times 1–Pb (картина ДМЭ представлена на рис. 3, *b*) молекул фуллерена C_{60} (график 1) и атомов лития (график 2). Эта реконструкция является металлической, а покрытие свинца составляет 1 ML, когда на поверхности формируется реконструкция 1 \times 1 [8]. Данная поверхность демонстрирует довольно высокую электропроводность через металлические поверхностные состояния, т.е. фактически в проводимости участвует самый верхний слой атомов [35]. Известно, что адсорбция молекул фуллерена на данную поверхность приводит к формированию плотноупакованного упорядоченного слоя из молекул C_{60} при комнатной температуре [36]. Так как молекулы C_{60} являются электроотрицательными и принимают на себя электроны верхнего слоя подложки [37], то, взаимодействуя с металлическими поверхностными состояниями, они в этом смысле являются акцептором электронов [38]. Такое изъятие

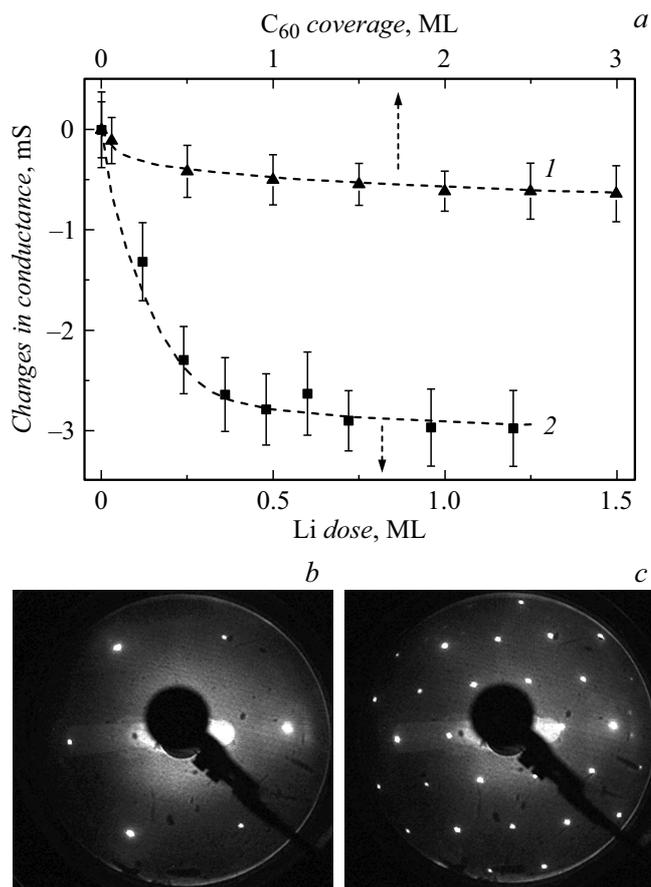


Рис. 3. Изменения поверхностной проводимости образцов кремния после осаждения молекул фуллерена C_{60} (график 1) и субмонослойных доз лития (график 2) на поверхности Si(111)1 \times 1–Pb (*a*). Картины ДМЭ для поверхности Si(111)1 \times 1–Pb (*b*) и Si(111)2 \times 2–(Pb,Li) (*c*). Энергия первичного пучка 56 eV.

электронов из поверхностных состояний также приводит к падению поверхностной проводимости реконструкции Si(111)1 \times 1–Pb из-за уменьшения в ней концентрации носителей заряда. Однако из-за того, что концентрация молекул фуллерена в 1 ML ($1.15 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$) существенно меньше, чем атомов в верхнем слое реконструированной поверхности ($7.8 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$), существенная доля носителей заряда остается в поверхностных состояниях и продолжает участвовать в электропроводности.

С другой стороны, адсорбция лития на данную поверхность должна была бы иметь обратный эффект: адсорбированный литий, являясь электроположительным, отдает электроны в металл, где они находятся в непосредственной близости от поверхности и экранируют адсорбированные ионы. Оказывается, в результате такого взаимодействия металлические поверхностные состояния разрушаются, а на поверхности формируется локализованный заряд. Обычно данный процесс на спектрах фотоэмиссии с угловым разрешением виден как размытие зоны поверхностных состояний вплоть

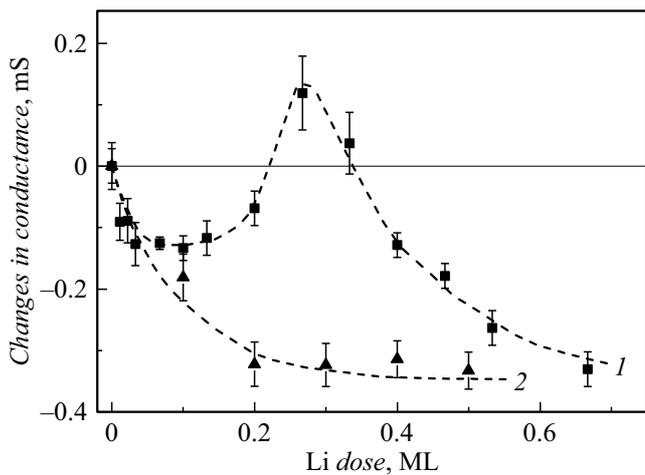


Рис. 4. Изменения поверхностной проводимости образцов кремния после осаждения лития на поверхность $\text{Si}(111)\beta-\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-Vi}$ (график 1). Для сравнения показан график изменений поверхностной проводимости после осаждения лития на поверхность $\text{Si}(111)7\times 7$ (график 2).

до полного их исчезновения, кроме того, наблюдается изменение положения объемных состояний вследствие уменьшения работы выхода [26]. Таким образом, для данной фазы, как и для предыдущего случая с поверхностью $\text{Si}(111)h-\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-(Au,Li)}$, электропроводность уменьшается до значений, близких к значению электропроводности чистой подложки из-за исчезновения канала проводимости по металлическому слою. Отличие же состоит в том, что при осаждении лития на поверхность $\text{Si}(111)1\times 1\text{-Pb}$ изменение концентрации адсорбированных атомов лития сопровождается изменением кристаллической структуры поверхности. При дозе лития, соответствующей покрытию адсорбированных атомов 0,25 ML, наблюдается картина ДМЭ 4×1 , а затем с увеличением дозы лития выше 0,3 ML формируется поверхностная структура 2×2 (рис. 3, c).

Рассмотрим еще одну поверхностную реконструкцию, $\text{Si}(111)\beta-\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-Vi}$, которая в отличие от предыдущих двумерных систем является полупроводниковой. Данная реконструкция содержит 1 ML атомов висмута, образующих тримеры в положениях T_1 на объемноподобной решетке кремния [39]. Электронная структура данной поверхности имеет дырочные поверхностные состояния ниже уровня Ферми, а также свободные поверхностные состояния выше уровня Ферми, причем ни одно из них уровень Ферми не пересекает [13]. Поверхностная проводимость для данной подложки, как показывают наши измерения, почти не отличается от проводимости исходной чистой поверхности $\text{Si}(111)7\times 7$. На рис. 4 показаны изменения проводимости после напыления лития на поверхность $\text{Si}(111)\beta-\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-Vi}$ при комнатной температуре, а для сравнения представлены измерения проводимости после напыления лития на чистую поверхность подложки $\text{Si}(111)7\times 7$. Видно,

что на начальной стадии дозировки поверхности литием (до 0,2–0,3 ML) поверхностная проводимость уменьшается, однако при покрытии лития 0,3 ML на поверхности $\text{Si}(111)\beta-\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-Vi}$ наблюдается небольшой пик проводимости при дозе лития 0,3 ML. В работе [40] с помощью расчетов из первых принципов было показано, что адсорбция $1/3$ ML щелочных металлов на поверхность $\text{Si}(111)\beta-\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-Vi}$ приводит к заполнению ранее свободной зоны поверхностных состояний, в результате данная зона с увеличением покрытия щелочного металла опускается вниз и пересекает уровень Ферми. Поверхностная проводимость в этом случае возрастает из-за увеличения числа носителей, что мы и наблюдаем на графике.

Заключение

В результате проведенных экспериментов по изучению влияния адсорбции лития на кристаллическую структуру и электропроводность кремния $\text{Si}(111)$ с предварительно сформированными на его поверхности реконструкциями показана возможность контролируемых изменений поверхностной проводимости подложек в зависимости от дозы осажденного лития, а также структурных и электронных свойств исходной поверхности. В работе наблюдались новые поверхностные реконструкции в системе $(\text{Pb,Li})/\text{Si}(111): 4\times 1$ и 2×2 . Установлено, что в общем случае, напыление лития на поверхностные реконструкции с заполненными поверхностными состояниями, имеющими металлический характер, такие, например, как $\text{Si}(111)h-\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-(Au,Li)}$ или $\text{Si}(111)1\times 1\text{-Pb}$, приводит к уменьшению поверхностной проводимости. Если на поверхности находятся незаполненные поверхностные состояния, то при определенных условиях, например, напылении лития на поверхность $\text{Si}(111)\beta-\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-Au}$ при температуре 250°C , или напылении $1/3$ ML лития на поверхность $\text{Si}(111)\beta-\sqrt{3}\times\sqrt{3}\text{-Vi}$ при комнатной температуре, электропроводность подложки повышается. В целом эти результаты демонстрируют, что на начальных стадиях адсорбции (при концентрации адсорбированного лития, соответствующей покрытию материала до 1 ML) при определенных условиях литий вызывает как структурные изменения на поверхности, так и оказывает влияние на электрофизические свойства поверхности подложки, в частности, на ее поверхностную проводимость.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 20-02-00497.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] B. Liang, Y. Liu, Y. Xu. *J. Power Sources*, **267**, 469 (2014). DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.05.096
- [2] H. Daimon, S. Ino. *Surf. Sci.*, **164**, 320 (1985). DOI: 10.1016/0039-6028(85)90715-0
- [3] H.H. Weitering, X. Shi, S.C. Erwin. *Phys. Rev. B*, **54**, 10585 (1996). DOI: 10.1103/PhysRevB.54.10585
- [4] C. Bromberger, J.N. Crain, K.N. Altmann, J.J. Paggel, F.J. Himpsel, D. Fick. *Phys. Rev. B*, **68**, 075320 (2003). DOI: 10.1103/PhysRevB.68.075320
- [5] V.G. Lifshits, A.A. Saranin, A.V. Zotov. *Surface Phases on Silicon* (Chichester, Wiley, 1993)
- [6] L.V. Bondarenko, D.V. Gruznev, A.A. Yakovlev, A.Y. Tupchaya, D. Usachov, O. Vilkov, A. Fedorov, D.V. Vyalikh, S.V. Eremeev, E.V. Chulkov, A.V. Zotov, A.A. Saranin. *Sci. Rep.*, **3**, 1826 (2013). DOI: 10.1038/srep01826
- [7] M. D'angelo, K. Takase, N. Miyata, T. Hirahara, S. Hasegawa, A. Nishide, M. Ogawa, I. Matsuda. *Phys. Rev. B*, **79**, 035318 (2009). DOI: 10.1103/PhysRevB.79.035318
- [8] E.P.Th.M. Suurmeijer, R. Benedictus, A. van der Stadt, T.M. Klapwijk. *Appl. Surf. Sci.*, **70**, 452 (1993). DOI: 10.1016/0169-4332(93)90559-T
- [9] L. Tang, Z.-L. Guan, D. Hao, J.-F. Jia, X.-C. Ma, Q.-K. Xue. *Appl. Phys. Lett.*, **95**, 193102 (2009). DOI: 10.1063/1.3262950
- [10] T. Nakamura, A. Takayama, R. Hobara, D.V. Gruznev, A.V. Zotov, A.A. Saranin, S. Hasegawa. *Appl. Surf. Sci.*, **479**, 679 (2019). DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.02.036
- [11] J. Yuhara, M. Yokoyama, T. Matsui. *J. Appl. Phys.*, **110**, 074314 (2011). DOI: 10.1063/1.3650883
- [12] H.M. Zhang, T. Balasubramanian, R.I.G. Uhrberg. *Phys. Rev. B*, **66** (2002) 165402. DOI: 10.1103/PhysRevB.66.165402
- [13] I. Gierz, T. Suzuki, E. Frantzeskakis, S. Pons, S. Ostanin, A. Ernst, J. Henk, M. Grioni, K. Kern, C.R. Ast. *Phys. Rev. Lett.*, **103**, 046803 (2009). DOI: 10.1103/PhysRevLett.103.046803
- [14] D.V. Gruznev, L.V. Bondarenko, A.V. Matetskiy, A.A. Yakovlev, A.Y. Tupchaya, S.V. Eremeev, E.V. Chulkov, J.-P. Chou, C.-M. Wei, M.-Y. Lai, Y.-L. Wang, A.V. Zotov, A.A. Saranin. *Sci. Rep.*, **4**, 4742 (2014). DOI: 10.1038/srep04742
- [15] M.V. Ryzhkova, D.V. Gruznev, E.A. Borisenko, D.A. Tsukanov. *Solid State Phenomena*, **213**, 65 (2014). DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.213.65
- [16] A.V. Matetskiy, D.V. Gruznev, A.V. Zotov, A.A. Saranin. *Phys. Rev. B*, **83**, 195421 (2011). DOI: 10.1103/PhysRevB.83.195421
- [17] K.-H. Wu, Y. Fujikawa, Y. Takamura, T. Sakurai. *Chinese J. Phys.*, **43**, 197 (2005). DOI: 10.1116/1.585546
- [18] T.M. Grehk, C.U.S. Larsson, N.P. Prince, S.A. Flodström. *Surf. Sci.*, **284**, L384 (1993). DOI: 10.1016/0039-6028(93)90512-I
- [19] Y. Hasegawa, I. Kamiya, T. Hashizume, T. Sakurai. *J. Vac. Sci. Technol. A*, **8**, 238 (1990). DOI: 10.1116/1.577074
- [20] C. Weindel, H.J. Jänsch, G. Kirchner, H. Kleine, J.J. Paggel, J. Roth, H. Winnefeld, D. Fick. *Phys. Rev. B*, **71**, 115318 (2005). DOI: 10.1103/PhysRevB.71.115318
- [21] H.H. Weitering, J. Chen. *J. Vac. Sci. Technol. A*, **11**, 2049 (1993). DOI: 10.1116/1.578408
- [22] K.O. Magnusson, B. Reihl. *Phys. Rev. B*, **41**, 12071 (1990). DOI: 10.1103/PhysRevB.41.12071
- [23] J.J. Paggel, G. Neuhold, H. Haak, K. Horn. *Surf. Sci.*, **414**, 221 (1998). DOI: 10.1016/S0039-6028(98)00514-7
- [24] R. Schillinger, C. Bromberger, H.J. Jänsch, H. Kleine, O. Köhlert, C. Weindel, D. Fick. *Phys. Rev. B*, **72**, 115314 (2005). DOI: 10.1103/PhysRevB.72.115314
- [25] D.V. Gruznev, I.N. Filippov, D.A. Olyanich, D.N. Chubenko, I.A. Kuyanov, A.A. Saranin, A.V. Zotov, V.G. Lifshits. *Phys. Rev. B*, **73**, 115335 (2006). DOI: 10.1103/PhysRevB.73.115335
- [26] L.V. Bondarenko, A.V. Matetskiy, A.A. Yakovlev, A.Y. Tupchaya, D.V. Gruznev, M.V. Ryzhkova, D.A. Tsukanov, E.A. Borisenko, E.N. Chukurov, N.V. Denisov, O. Vilkov, D.V. Vyalikh, A.V. Zotov, A.A. Saranin. *J. Phys.: Condens. Matter*, **26**, 055009 (2014). DOI: 10.1088/0953-8984/26/5/055009
- [27] J.K. Kim, K.S. Kim, J.L. McChesney, E. Rotenberg, H.N. Hwang, C.C. Hwang, H.W. Yeom. *Phys. Rev. B*, **80**, 075312 (2009). DOI: 10.1103/PhysRevB.80.075312
- [28] D.V. Gruznev, A.V. Matetskiy, L.V. Bondarenko, E.A. Borisenko, D.A. Tsukanov, A.V. Zotov, A.A. Saranin. *Surf. Sci.*, **605**, 1420 (2011). DOI: 10.1016/j.susc.2011.05.004
- [29] T. Nagao, S. Hasegawa, K. Tsuchie, S. Ino, C. Voges, G. Klos, H. Pfür, M. Henzler. *Phys. Rev. B*, **57**, 10100 (1998). DOI: 10.1103/PhysRevB.57.10100
- [30] F. Edler, I. Miccoli, J.P. Stöckmann, H. Pfnür, C. Braun, S. Neufeld, S. Sanna, W.G. Schmidt, C. Tegenkamp. *Phys. Rev. B*, **95**, 125409 (2017). DOI: 10.1103/PhysRevB.95.125409
- [31] N.D. Lang, W. Kohn. *Phys. Rev. B*, **4**, 4234 (1971). DOI: 10.1103/PhysRevB.7.3541
- [32] R.D. Diehl, R. McGrath. *J. Phys.: Condens. Matter*, **9**, 951 (1997). DOI: 10.1088/0953-8984/9/5/003
- [33] J.L. LaRue, J.D. White, N.H. Nahler, Z. Liu, Y. Sun, P.A. Pianetta, D.J. Auerbach, A.M. Wodtke. *J. Chem. Phys.*, **129**, 024709 (2008). DOI: 10.1063/1.2953712
- [34] M. Caragiu, G.S. Leatherman, R.D. Diehl, P. Kaukasoina, M. Lindroos. *Surf. Sci.*, **441**, 84 (1999). DOI: 10.1016/S0039-6028(99)00840-7
- [35] X. Tong, K. Horikoshi, S. Hasegawa. *Phys. Rev. B*, **60**, 5653 (1999). DOI: 10.1103/PhysRevB.60.5653
- [36] A.V. Zotov, D.A. Olyanich, V.V. Mararov, T.V. Utas, L.V. Bondarenko, A.Y. Tupchaya, D.V. Gruznev, A.N. Mihalyuk, C.M. Wei, Y.L. Wang, A.A. Saranin. *J. Chem. Phys.*, **149**, 034702 (2018). DOI: 10.1063/1.5038790
- [37] P.J. Moriarty. *Surf. Sci. Rep.*, **65**, 175 (2010). DOI: 10.1016/j.surfrep.2010.08.001
- [38] D.A. Tsukanov, M.V. Ryzhkova, E.A. Borisenko, L.V. Bondarenko, A.V. Matetskiy, D.V. Gruznev, A.V. Zotov, A.A. Saranin. *J. Appl. Phys.*, **110**, 093704 (2011). DOI: 10.1063/1.3658019
- [39] R.H. Miwa, T.M. Schmidt, G.P. Srivastava. *J. Phys.: Condens. Matter*, **15**, 2441 (2003). DOI: 10.1088/0953-8984/15/17/302
- [40] S.V. Eremeev, E.N. Chukurov, D.V. Gruznev, A.V. Zotov, A.A. Saranin. *J. Phys.: Condens. Matter*, **27**, 305003 (2015). DOI: 10.1088/0953-8984/27/30/305003