08,10

Миграция атомов Si на W(100) при образовании поверхностного силицида вольфрама

© Е.В. Рутьков, Е.Ю. Афанасьева, Н.Р. Галль

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: rutkov@ms.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 17 июля 2025 г.
В окончательной редакции 18 июля 2025 г.
Принята к публикации 18 июля 2025 г.

Методами электронной Оже-спектроскопии и термической десорбции изучена миграция атомов кремния по поверхности W(100) в широкой области покрытий и температур. Показано, что энергия активации миграции меняется от значений $E_m \geq 1.8$ eV при малых покрытиях до значений $E_m \approx 0.5$ eV при образовании поверхностного силицида WSi.

Ключевые слова: поверхностная диффузия, адсорбция, растворение, десорбция.

DOI: 10.61011/FTT.2025.08.61331.200-25

1. Введение

Адсорбция Si на вольфрамовых поверхностях была широко исследована [1–11]. Однако большинство работ были сосредоточены на поведении адатомов Si на грани W(110) [1–6]. Цонг и Казанова [1,2] изучали адсорбцию атомов Si на поверхности W(110) с помощью полевого ионного микроскопа, Солт и Гудман [5,6] исследовали сверхструктуру кремния, образованную на поверхности W(110) в зависимости от покрытия Si, используя температурно-программируемую десорбцию, электронную Оже-спектроскопию и дифракцию медленных электронов (LEED). Диффузия кремния в объем вольфрама изучалась методом атомного зонда [7]. Адсорбция Si на поликристаллических вольфрамовых поверхностях также изучалась методом термической десорбции [8]. Диффузия кремния в объем вольфрама, миграция по поверхности для трех низкоиндексных граней W(100), (110) и (111) была исследована в [11] с использованием теории функционала плотности.

Покрытие кремнием позволяет существенно менять адсорбционные и каталитические свойства вольфрама. Так, адсорбция CO, водорода и бензола изучалась при 120 K на покрытых кремнием поверхностях W(110) [6]. Покрытие CO снижалось с $\vartheta = 0.80$ в насыщении на чистой поверхности W(110) до $\vartheta = 0.40$ в присутствии 0.30 монослоя (ML) кремния и до $\vartheta = 0.21$ в присутствии 0.56 ML кремния. Диссоциация водорода, CO и бензола значительно подавлялась адсорбированным на поверхности вольфрама кремнием. При отжиге кремниевых слоев до $T = 1050$ K наблюдался рост силицида вольфрама, что приводило к увеличению каталитической активности поверхности. Система Si–W рассматривается как перспективная в технологии будущих термоядерных реакторов, где вольфрам играет роль дивертора, а кремний рассматривается в качестве элемента, защищающего стенки от эрозии [12,13].

В наших предыдущих работах изучалось взаимодействие кремния с поверхностью W(100) методами электронной Оже-спектроскопии и термической десорбции [9,10]. Было показано, что образование монослойного покрытия с концентрацией адатомов кремния $N = 1 \cdot 10^{15}\,\mathrm{cm}^{-2}$ (поверхностного силицида WSi) приводило при температурах 1100–1400 K к активному растворению вновь поступающих атомов Si в подложке, которые при меньших покрытиях в ней практически не растворялись. Была также определена энергия активации десорбции кремния, которая сильно зависела от покрытия, меняясь от 6.1 до 4.7 eV при увеличении покрытия от $\vartheta_{Si} = 0.1$ до $\vartheta_{Si} = 1.0$. Можно ожидать, что и миграционные характеристики адатомов будут сильно меняться при изменении покрытия, в частности, при достижении концентрации, соответствующей поверхностному силициду. Целью настоящей работы является определение миграционных энергетических параметров кремния на W(100) в интервале покрытий от субмонослойного до образования поверхностного силицида вольфрама.

2. Методика эксперимента

В настоящей работе для изучения поверхностной миграции одновременно использовали два метода: электронную Оже-спектроскопию (ЭОС), позволяющую регистрировать кремний, адсорбированный на поверхности, но не растворенный в объеме, и метод температурно программируемой десорбции (ТПД), дающий информацию об общей концентрации кремния в системе, как на поверхности, так и в объеме вольфрама.

Измерения проводились в сверхвысоком вакууме порядка $1 \cdot 10^{-10}$ Torr; термодесорбция Si с W ре-

гистрировалась специализированным времяпролетным масс-спектрометром, описанным в [9]. Электронные Оже-спектры измерялись с помощью призменного электронного Оже-спектрометра высокого разрешения ($\Delta E/E \approx 0.1\,\%$), позволявшего проводить измерения при высоких (до 2500 K) температурах образца [10]. Образцами служили текстурированные вольфрамовые ленты с размерами $0.01 \times 1 \times 30$ mm с преимущественным выходом грани (100) на поверхность, нагреваемые прямым пропусканием тока. Очистка лент от примесей проводилась по стандартной процедуре: в атмосфере кислорода при давлении $\sim 10^{-5}$ Torr и температуре 1500 K, а затем в сверхвысоком вакууме при $T = 2500$ K. После такой очистки регистрировались только Оже-пики вольфрама. При отжиге текстура прокатки сменялась текстурой рекристаллизации, и на поверхность выходила грань (100). Степень ориентации грани по данным рентгеновской дифракции составляла $\sim 99.5\,\%$. Работа выхода поверхности составляла $e\varphi = 4.65$ eV, что соответствовало грани (100) W, поверхность была однородна по работе выхода с точностью ± 0.05 eV. Время нагрева образца от 300 до 2000 K или его остывания до 300 K составляло менее 1 s. В методе ТПД образец нагревался линейно со скоростью 200 Ks^{-1}.

Температура образцов при $T > 1100$ K измерялась оптическим микропирометром, а в области более низких температур — путем линейной экстраполяции зависимости температуры от тока накала ленты к комнатной температуре.

Кремний напылялся на W(100) из штабиков с размерами $1 \times 1 \times 30$ mm, расположенными параллельно вольфрамовой ленте симметрично по обеим ее сторонам, что позволяло наносить покрытия как на рабочую, так и на обратную сторону образца непосредственно в сверхвысоковакуумных условиях. В камере имелись коллекторные системы для измерения токов термоэмиссии с обеих сторон ленты, позволявшие сравнивать потоки атомов кремния, падавших на лицевую и обратную стороны ленты по изменению работы выхода на них. Абсолютная калибровка потоков кремния производилась методом кварцевых весов, в основе которого лежит явление сдвига резонансной частоты кварцевого вибратора при напылении на него тонких пленок чужеродного вещества. Процедура измерений сводилась к следующему: на W-ленту при заданной температуре $T_{\mathrm{W}} = \mathrm{const}$ напылялся кремний (на одну сторону или на обе стороны). Затем распылители Si выключались, лента остывала до $T = 300$ K, и производилась высокотемпературная вспышка или регистрация Оже-спектров кремния ($E_{\mathrm{Si}} = 92$ eV) и вольфрама ($E = 163-179$ eV). Интенсивность Оже-сигналов измерялась „peak-to-peak“. По площади термодесорбционных спектров на массовом числе 28 определялось количество десорбировавшегося кремния.

Возможность напыления кремния на обе стороны ленты (лицевую и обратную, рис. 1, вставка) упрощало правильную интерпретацию результатов опыта.

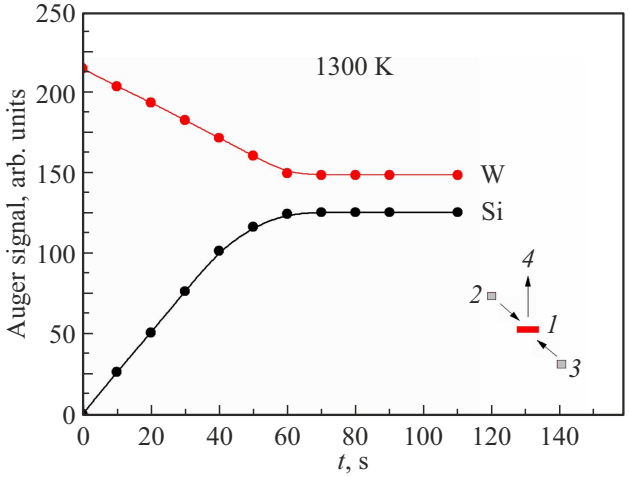

Рис. 1. Изменение интенсивности Оже-сигналов кремния и вольфрама от времени при напылении атомов Si на W-ленту с двух сторон при $T = 1300$ K. Плотность потока кремния составляет $\vartheta_{\mathrm{Si}} \approx 1.7 \cdot 10^{13}\,\mathrm{cm}^2 \cdot \mathrm{s}^{-1}$. На вставке — схема расположения напылителей и образца в аналитической камере: *1* — вольфрамовая лента; *2, 3* — напылители кремния; *4* — вход в анализатор ЭОС или масс-спектрометр.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлена зависимость интенсивности Оже-сигналов кремния и вольфрама от времени напыления кремния при $T = 1300$ K на обе стороны ленты равными потоками. Видно, что до $t \approx 50$ s наблюдается линейная зависимость роста интенсивности Оже-сигнала кремния от времени, при этом концентрация кремния $N_{\mathrm{Si}} = \upsilon_{\mathrm{Si}} t$. Достижение плато на графике соответствует образованию поверхностного соединения (ПС) WSi с концентрацией атомов кремния, равной монослойной $N_{\mathrm{Si}} = 1 \cdot 10^{15}\,\mathrm{cm}^{-2}$ [10].

При $t > 60$ s не наблюдается накопления на поверхности поступающего кремния сверх $N_{\mathrm{Si}} = 1 \cdot 10^{15}\,\mathrm{cm}^{-2}$, следовательно, атомы кремния либо десорбируются, либо растворяются в объеме подложки, или оба процесса имеют место.

Ответы на эти вопросы дает метод ТПД.

На рис. 2 представлены зависимости количества регистрируемого при термодесорбции кремния от времени его напыления на поверхность вольфрама. График *1*, соответствующий напылению кремния на обе стороны ленты равными потоками при $T = 1300$ K, аппроксимируется прямой и совпадает с аналогичной зависимостью, полученной напылением при $T = 300$ K. Это свидетельствует в пользу отсутствия заметной термодесорбции кремния при $T \leq 1300$ K. Следовательно, весь напыляемый кремний после достижения концентрации на поверхности $N_{\mathrm{Si}} = 1 \cdot 10^{15}\,\mathrm{cm}^{-2}$ (образования ПС WSi) растворяется в объеме металла — это приводит к непрерывному росту площади термодесорбционных спектров

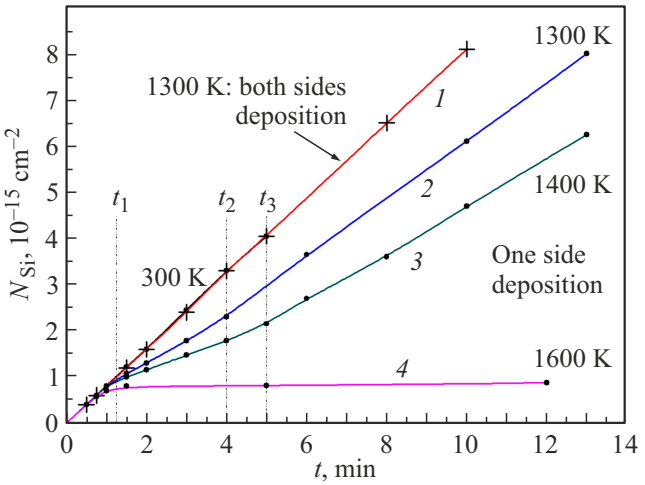

Рис. 2. Зависимости количества десорбировавшихся атомов кремния от времени напыления при различных температурах вольфрама постоянным потоком $\vartheta_{Si} \approx 1.3 \cdot 10^{13}\,\mathrm{cm}^{-2} \cdot \mathrm{s}^{-1}$. Кривая *1* — напыление на обе стороны при 300 и 1300 K; *2, 3, 4* — напыление на лицевую сторону при 1300, 1400 и 1600 K соответственно.

при неизменности поверхностного покрытия, что подтверждается методом ЭОС (рис. 1).

В случае напыления кремния только на лицевую сторону ленты при той же температуре $T = 1300$ K (кривая *2*, рис. 2) видно, что в диапазоне времен $0 < t < t_1$ зависимости *1* и *2* совпадают — на поверхности образуется ПС WSi. При $t > t_1$ наблюдается отклонение кривой *2* от кривой *1*. Поскольку при этой температуре не наблюдатся десорбция Si с W, то данный факт „потери“ кремния можно объяснить только миграцией атомов кремния на обратную сторону ленты. При более высоких температурах можно ожидать „потерю“ кремния при его напылении на лицевую сторону ленты не только за счет миграции на обратную сторону, но и за счет десорбции атомов Si с поверхности (кривые *3* и *4* на рис. 2). Чтобы разделить эти два процесса, кремний напылялся равными потоками на обе стороны ленты, что позволило уравновесить миграционные потоки.

На рис. 3 показаны графики зависимостей количества десорбирующихся атомов кремния от времени его напыления при различных температурах подложки [9]. Видно, что при $T = 1400$ K (кривая *2*) наблюдается отклонение зависимости количества регистрируемого кремния $N_{Si}(t)$ от линейной $N_{Si} = \upsilon_{Si} t$ (для 1300 K), что можно объяснить только термодесорбцией атомов кремния в процессе напыления. Очевидно, что чем выше температура образца, тем эффективнее десорбция, тем меньше кремния накапливается в системе (ср. зависимости *1–4*, рис. 3).

Отметим, что при напылении Si на W-ленту при $T = 1600$ K концентрация атомов кремния на поверхности не превышает $N_{Si} = 0.8 \cdot 10^{15}\,\mathrm{cm}^{-2}$. Этот же результат дает метод ЭОС. Причем зависимости $N_{Si}(t)$, в случае напыления на лицевую сторону (кривая *4*, рис. 1) и на обе стороны (кривая *4*, рис. 3) практически совпадают. Это связано, по-видимому, с тем, что десорбционный поток при таких температурах и покрытиях поверхности кремнием существенно превышает миграционный поток и поток растворения атомов кремния в объем вольфрама.

Упрощенная физическая картина процессов на поверхности W(100) с участием атомов кремния представлена на рис. 4 (для наглядности геометрические размеры ленты, имеющей сечение $10^{-2} \times 1$ mm, сильно искажены).

Зависимость $N_{Si}(t)$ (кривая *2*) на рис. 2, снятая при $T = 1300$ K, имеет две точки перегиба, соответствующие временам напыления t_1 и t_2. На ней можно выделить три участка: первый, при $0 < t < t_1$, соответствует линейному росту концентрации кремния на поверхности до $N_{Si} = 1 \cdot 10^{15}\,\mathrm{cm}^{-2}$ (образованию поверхностного соединения WSi, рис. 4). После его образования начинаются одновременно и активное растворение атомов кремния в вольфраме, и миграция атомов Si на обратную сторону. На втором участке при $t_1 < t < t_2$ наблюдается

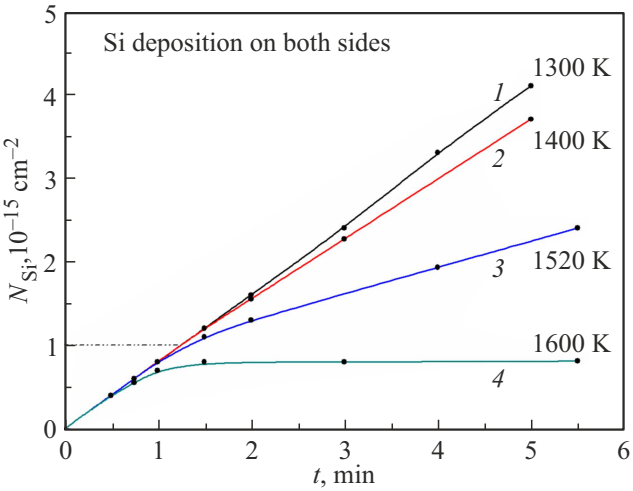

Рис. 3. Зависимости количества десорбировавшихся атомов кремния от времени напыления на обе стороны равными потоками $\vartheta_{Si} \approx 1.3 \cdot 10^{13}\,\mathrm{cm}^{-2} \cdot \mathrm{s}^{-1}$ при различных температурах вольфрама T, K: кривая *1* — 1300, *2* — 1400, *3* — 1520, *4* — 1600.

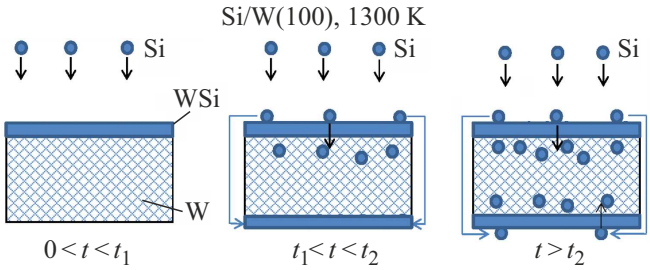

Рис. 4. Схематическое представление процессов, происходящих при напылении атомов кремния только на лицевую сторону при $T = 1300$ K.

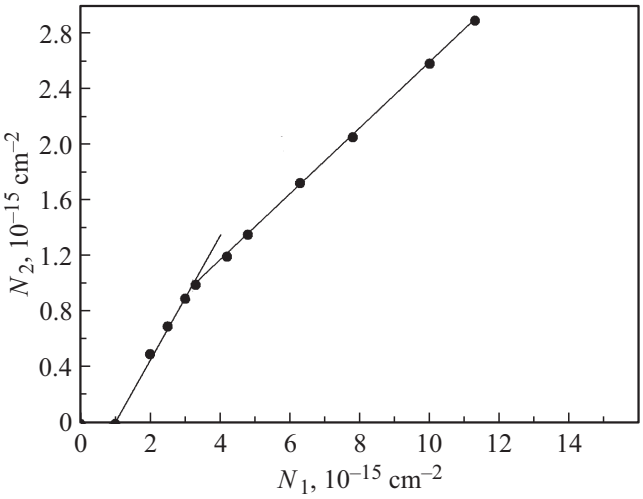

Рис. 5. Зависимость потери Si за счет миграции на обратную сторону ленты N_2 от числа упавших при $T = 1300$ K на лицевую сторону атомов кремния N_1; $\vartheta_{\mathrm{Si}} = 1.3 \cdot 10^{13}\,\mathrm{cm}^{-2} \cdot \mathrm{s}^{-1}$.

миграция Si на обратную сторону ленты и увеличение там покрытия кремния до $N_{\mathrm{Si}} = 1 \cdot 10^{15}\,\mathrm{cm}^{-2}$ (образование поверхностного силицида на обратной стороне), рис. 4. После его образования при $t > t_2$ кремний начинает активно растворяться в подложке уже не только с лицевой, но и с обратной стороны. Спустя некоторое время устанавливается стационарный режим. Концентрация атомов Si вдоль всей поверхности W-ленты остается неизменной ($N_{\mathrm{Si}} \approx 1 \cdot 10^{15}\,\mathrm{cm}^{-2}$), и скорости всех процессов не зависят от времени. Действительно, точки зависимости *2* на третьем участке, $t > t_2$, хорошо ложатся на прямую (рис. 2). В момент установления стационарного режима на обратную сторону ленты при $T = 1300$ K промигрировал кремний в концентрации $N_{\mathrm{Si}} \approx 1 \cdot 10^{15}\,\mathrm{cm}^{-2}$, что соответствует предложенной модели. Следует отметить аналогичный ход зависимости $N_{\mathrm{Si}}(t)$, снятой при $T = 1400$ K (рис. 2, график *3*) — линейный рост концентрации до $N_{\mathrm{Si}} = 1 \cdot 10^{15}\,\mathrm{cm}^{-2}$, две точки перегиба при t_1 и t_3 с последующим линейным ростом концентрации кремния (стационарный режим). В этом случае все описанные выше процессы несколько затянуты во времени по сравнению с $T = 1300$ K, что связано с начинающейся термической десорбцией кремния (рис. 3), приводящей к потере части вещества.

Перестроим графики *1* и *2* (рис. 2) для $T = 1300$ K в следующих координатах: по оси абсцисс отложим общее количество атомов кремния, поступивших на лицевую поверхность образца N_1 (в единицах cm^{-2}), а по оси ординат — количество атомов, перешедших на обратную сторону ленты N_2, также в единицах cm^{-2} (рис. 5). Видно, что вначале все адатомы остаются на лицевой поверхности и при приближении к концентрации кремния $N_{\mathrm{Si}} = 1 \cdot 10^{15}\,\mathrm{cm}^{-2}$ начинают мигрировать на обратную сторону ленты. При $N_1 \approx 3 \cdot 10^{15}\,\mathrm{cm}^{-2}$ на обратную сторону ленты перешел кремний с $N_2 = 1 \cdot 10^{15}\,\mathrm{cm}^{-2}$ и там образовал также поверхностный силицид. Тогда в объем вольфрама с его лицевой стороны диффундировал кремний в концентрации: $N_1 - 2N_2 = 1 \cdot 10^{15}\,\mathrm{cm}^{-2}$. Таким образом, опыт показывает, что количество адатомов кремния, промигрировавших на обратную сторону ленты, соизмеримо с количеством растворенных в объеме вольфрама. Этот факт косвенно указывает на то, что времена жизни адатомов Si относительно растворения близки к временам миграции атомов на обратную сторону ленты. Этим процессам соответствует график *2* на рис. 2 для времени $t_2 = 4$ min.

Эксперимент показывает, что и после образования ПС WSi как на лицевой поверхности вольфрамовой ленты, так и на ее обратной стороне миграционные процессы активно продолжаются — см. рис. 2 (кривая *2* для $t > t_2$; кривая *3* для $t > t_3$) и рис. 5 для $N_1 > 3.2 \cdot 10^{15}\,\mathrm{cm}^{-2}$. Изменился лишь наклон прямой, что связано, по-видимому, с завершением образования ПС WSi на обратной стороне ленты.

Средняя длина x миграции адатомов в направлении, перпендикулярном торцу ленты, за некоторое время t определяется формулой $x = (2Dt)^{1/2}$ [14], в которой $D = D_0 \exp[-E_{\mathrm{m}}/(k_{\mathrm{B}}T)]$ — коэффициент поверхностной диффузии, E_{m} — энергия активации миграции по поверхности вольфрама, k_{B} — постоянная Больцмана. Величина $D_0 = \lambda_0^2 k_{\mathrm{B}} T/h$, где λ_0 — длина миграционного скачка [15]. Если $\lambda_0 = 3$ Å, тогда $D_0 \approx 2.7 \cdot 10^{-2}\,\mathrm{cm}^2 \cdot \mathrm{s}^{-1}$ при $T = 1300$ K. Таким образом,

$$x = 2D_0 t \exp[-E_{\mathrm{m}}/(k_{\mathrm{B}}T)]^{1/2}. \qquad (1)$$

Оценим энергию активации миграции для $\theta_{\mathrm{Si}} \geq 1$, используя метод ЭОС. Для этого на поверхностный силицид WSi, образованный на лицевой стороне, дополнительно адсорбировали при $T = 300$ K кремний до концентрации $N_{\mathrm{Si}} = 0.3 \cdot 10^{15}\,\mathrm{cm}^{-2}$ и скачком поднимали температуру до $T = 1300$ K. Как следует из рис. 2, после образования на поверхности W поверхностного силицида при $T = 1300$ K начинаются процессы растворения и миграции, причем потоки этих процессов соизмеримы. Метод ЭОС показал, что „лишний“ кремний уходит с лицевой поверхности за счет растворения и миграции за время $t \approx 5$ s.

Таким образом, при $T = 1300$ K адатомы Si мигрируют по поверхностному силициду WSi (с лицевой стороны ленты на обратную) за время $t \approx 5$ s, пройдя расстояние x, равное половине ширины ленты $l/2 = 0.05$ cm. В этом случае из формулы (1) можно найти $E_{\mathrm{m}} \approx 0.5 \pm 0.1$ eV.

Эта величина близка к значению, рассчитанному в работе [11] с помощью метода функционала плотности для миграции атомов кремния во втором слое на грани W(100): $E_{\mathrm{m}} = 0.62$ eV.

Мы оценили энергию активации миграции Si по поверхности W(100) $E_{\mathrm{m}} \approx 0.5$ eV, для $\vartheta \geq 1$. Миграцию кремния на обратную сторону ленты для покрытий $\vartheta < 1$ мы не наблюдали экспериментально ни при каких

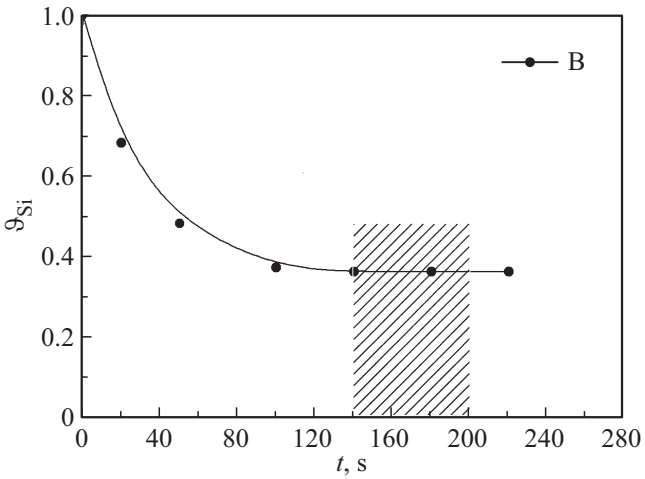

Рис. 6. Зависимость степени покрытия вольфрама кремнием ϑ_{Si} от времени отжига ленты при $T = 1835$ K. $\vartheta_{Si} = 1$ соответствует ПС WSi с $N_{Si} = 1 \cdot 10^{15}$ cm^{-2}.

температурах. Тем не менее, нижний предел энергии активации миграции Si по поверхности W(100) для этих покрытий можно оценить из опытов по десорбции Si с W с использованием метода ЭОС. На рис. 6 в качестве примера показана кривая десорбции кремния с вольфрама с начальным состоянием $\vartheta_{Si} = 1$ при $T = 1835$ K, где интенсивности Оже-сигнала кремния пересчитаны в степень покрытия. Видно, что при достижении $\vartheta_{Si} = 0.38$ не наблюдается в течение 1 min ни десорбции, ни растворения, ни миграции кремния на обратную сторону ленты ($\vartheta_{Si} = \text{const}$). Зададимся параметром x — длиной миграции адатома Si за время опыта 60 s. Экспериментально легко заметить возможные потери кремния за счет миграции адатомов в количестве 10% (с учетом двух торцов ленты). Это значит, что в нашем примере $x \leq 5 \cdot 10^{-3}$ cm (длина миграции через один торец ленты). В этом случае по формуле (1), подставляя значения $t = 60$ s; $D_0 = 10^{-2}$ cm$^2 \cdot$ s^{-1}; $T = 1835$ K, можно найти $E_m \geq 1.7$ eV. Опыт показывает, что чем выше температура отжига, тем меньшее покрытие кремнием соответствует плато. При уменьшении покрытия растут энергия активации десорбции и энергия активации растворения, и логично ожидать, что и энергия активации миграции также будет расти.

В таблице приведена характерная температура плато для данного покрытия ϑ_{Si} и оценка величины E_m, рассчитанная так, как и в рассмотренном выше примере для $T = 1835$ K.

Видно, что E_m для $\vartheta_{Si} < 1$ значительно выше, чем для покрытий $\vartheta_{Si} > 1$. Это связано с тем, что все сильносвязанные центры уже заняты адатомами кремния и дальнейшая миграция по сути — миграция кремния по поверхностному силициду WSi. Следует отметить, что полученные оценки согласуются со значениями энергии активации миграции атомов Si на W(100), рассчитанными методом функционала плотности: $E_m = 1.94$ eV для $\vartheta_{Si} \ll 1$ и $E_m = 0.62$ eV для $\vartheta_{Si} > 1$ [11].

Зависимость энергии активации поверхностной миграции атомов кремния от покрытия. Оценки проводились по результатам,полученным при температурах, указанных во втором столбце таблицы

ϑ_{Si}	T, K	E_m, eV
> 1	300	0.5
0.56	1600	≥ 1.5
0.44	1700	≥ 1.6
0.38	1765	≥ 1.65
0.30	1835	≥ 1.7
0.16	1900	≥ 1.75
0.05	1965	≥ 1.81

Резкое уменьшение энергии активации миграции кремния во втором слое после образования поверхностного силицида до $E_m \approx 0.5$ eV кажется вполне разумным и хорошо вписывается в общую энергетику процессов на поверхности W(100) с участием атомов кремния. Действительно, после образования ПС WSi ($\vartheta_{Si} = 1$) энергия активации десорбции адатома кремния с вольфрама уменьшается от 6.1 eV при $\vartheta_{Si} \ll 1$ до 4.7 eV [9]. При малых покрытиях кремний не растворяется в объеме вольфрама даже при температурах 1800–1900 K, тогда как после образования ПС WSi вновь поступающие атомы Si быстро растворяются уже при $T = 1100$ K [10].

4. Заключение

Показано, что величина энергии активации миграции атомов кремния по поверхности вольфрама существенно зависит от покрытия и меняется от величины $E_m > 1.8$ eV при малых субмонослойных покрытиях до величины порядка 0.5 eV при достижении поверхностного силицида. Качественно, похожие изменения в энергиях растворения и десорбции наблюдались и ранее при приближении к состоянию поверхностного химического соединения для различных адсорбционных систем M–X, где M — металлическая подложка, а X — элемент 3–6 группы периодической системы. Так, для системы C–W(100) при малых покрытиях углерод начинал растворяться в объеме металла при $T \geq 1900$ K, но после образования поверхностного карбида WC ($N_C = 1 \cdot 10^{15}$ cm^{-2}) температура растворения уменьшалась до 700–800 K. Видимо, достижение такого насыщенного адсорбционного состояния аналогичным образом влияет и на энергию активации миграции, и схожее поведение можно ожидать и для других адсорбционных систем.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] R. Casanova, T.T. Tsong. Surf. Sci. **109**, *1*, L497 (1981). https://doi.org/10.1016/0039-6028(81)90505-7
[2] R. Casanova, T.T. Tsong. Thin Solid Films **93**, *1–2*, 41 (1982). https://doi.org/10.1016/0040-6090(82)90090-6
[3] C.A. Kiwanga, R.A. Collins. Physica Status Solidi (a) **23**, *1*, 209 (1974). https://doi.org/10.1002/pssa.2210230122
[4] A.P. Janssen, J.P. Jones. Surf. Sci. **41**, *1*, 257 (1974). https://doi.org/10.1016/0039-6028(74)90308-2
[5] A.G. Sault, D.W. Goodman. Surf. Sci. **235**, *1*, 28 (1990). https://doi.org/10.1016/0039-6028(90)90103-F
[6] A.G. Sault, D.W. Goodman. J. Catal. **126**, *1*, 57 (1990). https://doi.org/10.1016/0021-9517(90)90046-M
[7] O. Nishikawa, Y. Tsunachima, E. Nomura, S. Horie, M. Wada, M. Shibata, T. Yoshimura, R. Uemori. J. Vac. Sci. Technol. B **1**, *1*, 6 (1983). https://doi.org/10.1116/1.582506
[8] M. Hashimoto, T. Matsushima, K. Azuma, T. Matsui. Surf. Sci. **137**, *1*, L75 (1984). https://doi.org/10.1016/0039-6028(84)90671-X
[9] В.Н. Агеев, Е.Ю. Афанасьева. Поверхность **7**, 30 (1987).
[10] В.Н. Агеев, Е.Ю. Афанасьева, Н.Р. Галль, С.Н. Михайлов, Е.В. Рутьков, А.Я. Тонтегоде. Поверхность **5**, 6 (1987).
[11] L. Yang, B.D. Wirth. Nucl. Fusion **63**, *12*, 126004 (2023). https://doi.org/10.1088/1741-4326/acf4a9
[12] Z.L. Tang, G.Z. Zuo, C.L. Li, M. Huang, X.B. Zhang, J.S. Hu. J. Nucl. Mater. **555**, 153146 (2021). https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2021.153146
[13] H. Mao, F. Ding, G.-N. Luo, Z. Hu, X. Chen, F. Xu, J. Hu, G. Zuo, Z. Sun, Y. Yu, J. Wu, L. Wang, Y. Duan, J. Xu, J. Chen, Z. Yang, R. Ding, H. Xie. Nucl. Mater. Energy **12**, 447 (2017). https://doi.org/10.1016/j.nme.2016.12.010
[14] T.T. Tsong. Rep. Prog. Phys. **51**, *6*, 759 (1988). https://doi.org/10.1088/0034-4885/51/6/001
[15] A.G. Naumovets, Yu.S. Vedula. Surf. Sci. Rep. **4**, *7–8*, 365 (1985). https://doi.org/10.1016/0167-5729(85)90007-X

Редактор Е.В. Толстякова