

08

## Некоторые особенности конденсации атомов кремния на поверхности монокристалла вольфрама

© О.Л. Голубев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: O.Golubev@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 25 июля 2019 г.  
В окончательной редакции 25 июля 2019 г.  
Принято к публикации 16 сентября 2019 г.

С помощью методов полевой эмиссионной микроскопии изучена конденсация Si на поверхности W при различных температурах подложки  $T$  и количествах  $n$  моноатомных слоев осажденного конденсата. При низких  $T \sim 600$  К на поверхности формируется низкотемпературный монослой Si со структурой чистого W, тогда как при  $T \geq 1000$  К формируется другая структура высокотемпературного монослоя или поверхностного силицида. Низкотемпературный монослой и поверхностный силицид различаются также и ориентирующим действием при наращивании слоев Si. В случае конденсации на низкотемпературный монослой собственные кристаллиты Si формируются уже начиная с третьего монослоя  $n \geq 3$ , тогда как при конденсации на поверхностный силицид рост кристаллитов Si происходит начиная с  $n \geq 300$  монослоев. Определены величины энергий активации  $Q_{\text{diff}}$  объемной диффузии Si в объем W и энергии десорбции  $Q_{\text{des}}$  атомов Si с поверхности W.

**Ключевые слова:** кремний, вольфрам, адсорбция, моноатомный слой.

DOI: 10.21883/JTF.2020.03.48933.283-19

### Введение

Исследование адсорбции кремния на поверхности вольфрама и происходящие при этом структурные формоизменения являются важным аспектом современной физики поверхности и эмиссионной электроники со многих точек зрения. Подобного рода исследованиям было посвящено достаточно много работ с использованием разных методик, например [1,2], и в том числе с использованием полевых эмиссионных методов [3–5], методы эти дают определенные преимущества за счет своей специфики — прежде всего высокого пространственного разрешения и возможности работать при любых  $T$  образца от криогенных до близких к  $T$  плавления. Однако работы эти касались в основном адсорбции и миграции одиночных атомов Si и определения энергий активации для миграции адсорбированных атомов (ада-томов) Si на отдельных гранях различных металлов, либо изучению начальных стадий образования объемных силицидов разных металлов. Следует отметить, что в последнее время большой интерес проявляется к изучению формирования на поверхности металлов и соединений так называемых силицидов — моноатомных слоев со структурой типа графена, однако в этих экспериментах вольфрамовые подложки как правило не используются [6,7].

При этом неизученным оставались вопросы закономерностей кристаллического роста пленок самого Si на поверхности металлов при широкой вариации количества моноатомных слоев (монослоев)  $n$ -сконденсированного адсорбата и при значительном изменении

температуры подложки  $T_s$ . Подобного рода исследования могут, во-первых, позволить выявить интересные закономерности кристаллического роста, а во-вторых, прояснить проблемы создания на поверхности металлов точечных источников электронов и ионов, состоящих как из самого кремния, так и из силицидов металлов. Кроме того, подобные исследования могут представить интерес для проблемы формирования таких точечных источников электронов и ионов, которые могут образовываться по поверхности W при одновременном воздействии высоких  $T$  и сильных электрических полей  $F$  на слои кремниевого адсорбата на W [8]. Таким образом, целью настоящей работы было изучение структурных формоизменений слоев Si на W и термической стабильности данных слоев при широкой вариации количества сконденсированного материала и температуры подложки.

### 1. Методика и техника эксперимента

Основные эксперименты, результаты которых представлены в настоящей работе, были выполнены с помощью методов полевой эмиссионной микроскопии при конденсации Si на W, ряд экспериментов был проведен с эмиттерами-подложками из Ir и Re, которые дали схожие результаты и здесь рассматриваться не будут. Монокристаллические острия с радиусом кривизны в доли микрон получались методом обычного электролитического травления. Получение слоев атомарно чистого Si на поверхности представляет собой

довольно сложную задачу, поскольку Si обладает все же невысокой температурой плавления  $T = 1680$  К, но при этом имеет достаточно значительную теплоту испарения  $\lambda_0 = 4.5\text{--}4.9$  эВ. Для получения достаточно больших потоков атомов Si предпочтительно осуществлять конденсацию из жидкой фазы, нагревая Si выше  $T$  плавления. Однако в этом случае приходится использовать тигли и при этом очень трудно обеспечить атомарную чистоту покрытия. В нашем случае источником Si служила накаливаемая током кремниевая пластина высокой чистоты с удельным сопротивлением  $\rho = 10^{-2}$   $\Omega \cdot \text{cm}$ , легированная сурьмой с концентрацией  $10^{17}$  ат/см<sup>2</sup>. Концентрация легирующего элемента ничтожно мала  $\sim 10^{-3}\%$ , однако если теплота испарения Sb из матрицы Si меньше собственной теплоты испарения Si, то поток атомов Sb в принципе может быть значителен. Поэтому для очистки источник Si тренировался прогревом в высоком вакууме  $p = 10^{-8}\text{--}10^{-9}$  Па в течение 15–20 ч при  $T = 1500\text{--}1600$  К. Подобная тренировка обеспечивала полную очистку источника от примесей, как это показал масс-спектрометрический контроль потока атомов Si, осуществленный по методике, описанной в работе [2]. Эксперименты проводились на универсальной высоковакуумной установке, позволявшей совмещать режимы работы полевого электронного, ионного и десорбционного микроскопов [9]. Напряженность электрического поля  $F$  и работа выхода  $\phi$  определялись традиционными методами из наклона эмиссионных характеристик Фаулера–Нордгейма [10].

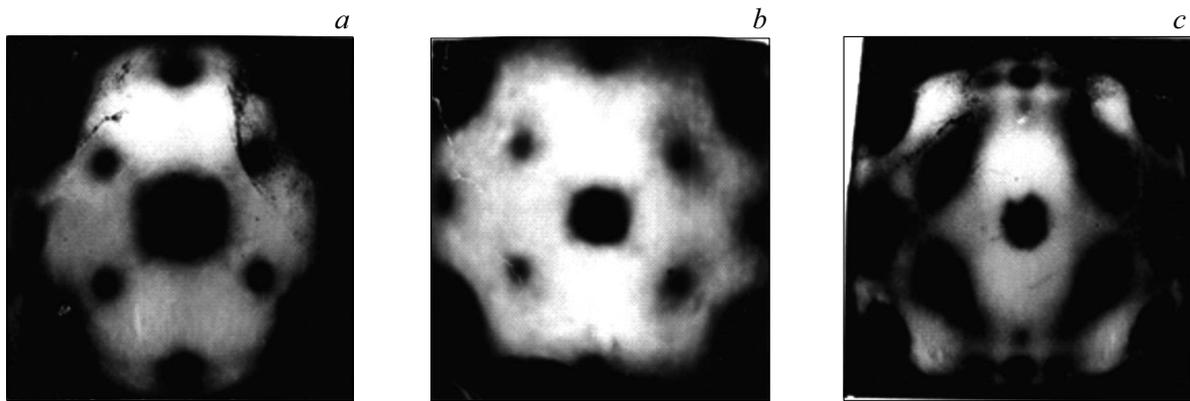
## 2. Результаты и обсуждение

### 2.1. Домонослойные и монослойные покрытия кремния

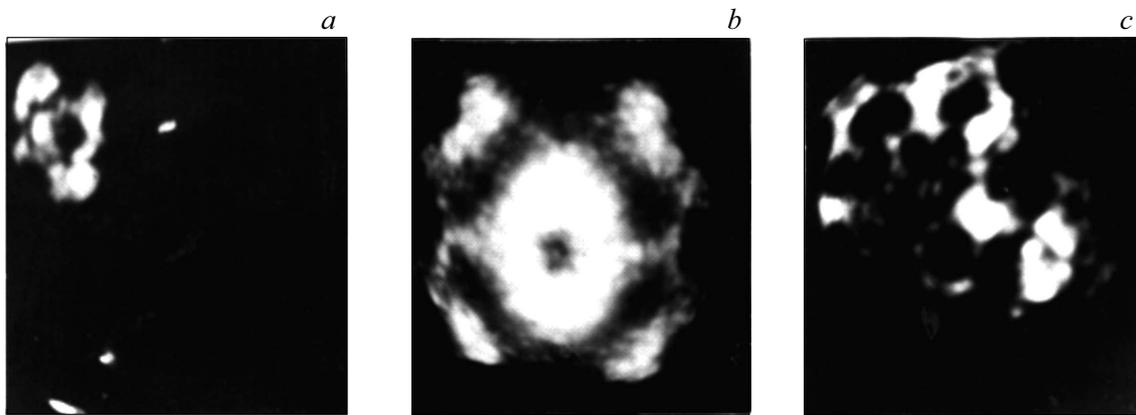
Эксперименты по конденсации Si на поверхности вольфрамового монокристаллического острья-эмиттера при различных температурах подложки  $T_s$  и разных, но относительно небольших количествах адсорбата — домонослойных и монослойных толщиной  $n = 0.1\text{--}1.5$  моноатомных слоев (монослоев) показали, что при домонослойных и монослойных покрытиях слой адсорбата при разных  $T_s$  подложки может быть в трех принципиально разных структурных состояниях. При низких температурах  $T_s \leq 300$  К на поверхности W формируется неупорядоченный, практически аморфный слой Si, однако рост  $T_s$  вызывает упорядочение слоя адсорбата и уже при  $T_s = 450\text{--}650$  К слой полностью упорядочивается и образуется структура, которую можно назвать „низкотемпературный монослой“. Низкотемпературный монослой является псевдоморфной структурой, которая примерно соответствует структуре поверхности чистого W. Наконец, уже при высоких  $T_s \geq 1000$  К (начинается этот процесс уже при 700 К) образуется характерная структура высокотемпературного монослоя, при этом происходит реконструкция поверхности W, которая выражается в том, что значительно расширяются грани  $\{112\}$  и

формируются новые грани типа  $\{012\}$  вокруг граней куба  $\{001\}$ , эти грани отсутствуют на поверхности чистого W и низкотемпературного монослоя. Структуру высокотемпературного монослоя можно назвать „поверхностный силицид“, термин этот был введен довольно давно авторами [2], при этом под данным термином понималось состояние геометрического монослоя Si на поверхности W, которое возникало при концентрации  $n = 1 \cdot 10^{15}$  ат/см<sup>2</sup> атомов Si на грани  $\{100\}$  W, когда на один атом Si приходится один атом W. Нам представляется, что термином поверхностный силицид лучше характеризовать не любой упорядоченный монослой с определенной концентрацией, а монослойное покрытие, связанное с реконструкцией поверхности подложки, что связано, в свою очередь, с химическим взаимодействием атомов адсорбата и атомов поверхности. Полевые электронные изображения поверхности, соответствующие низкотемпературному монослою Si, полученному при  $T_s = 650$  К, и поверхностному силициду, который получен при  $T_s = 1200$  К, показаны на рис. 1, *a, c* соответственно (рис. 1, *a* — чистый W).

Однако главным различием между низкотемпературным монослоем и поверхностным силицидом является не структурное отличие, а разное ориентирующее действие при наращивании на них новых слоев Si. Если конденсацию Si проводить на поверхность низкотемпературного монослоя, то уже, начиная с небольших покрытий  $n \geq 3$ , можно наблюдать образование мелких собственных кристаллитов Si. На рис. 2, *a* показано образование подобных кристаллитов при  $n = 4$  и  $T_s = 650$  К. Если же конденсацию проводить на поверхность, соответствующую поверхностному силициду, то характер ростового процесса совершенно иной. Рис. 2, *b* демонстрирует полевое электронное изображение поверхности, соответствующие эксперименту, который проводился следующим образом. Вначале при  $T_s$  острья, равной 1200 К, конденсировался монослой Si и получался поверхностный силицид, показанный на рис. 1, *c*, затем  $T_s$  острья опускалась до той же  $T_s = 640$  К и производилась конденсация следующих слоев Si. Видно, что даже при конденсации 250 монослоев наблюдается поверхностная структура, характерная для поверхностного силицида, и собственные кристаллиты Si не образуются (рис. 2, *b*). Только при достижении покрытий  $n \sim 300$  монослоев (рис. 2, *c*) наблюдается образование значительного количества кристаллитов Si с собственной огранкой. Таким образом, эксперименты, некоторые стадии которых показаны на рис. 2, позволяют сделать вывод, что при конденсации Si на поверхность низкотемпературного монослоя реализуется механизм роста Странского–Крастанова, когда один (может быть и два) монослоя экранируют влияние подложки, после чего становится возможным рост собственных кристаллитов Si. В случае же конденсации на поверхностный силицид реконструкция создает поверхность, благоприятную для наращивания почти невозмущенных (ненапряженных) слоев Si с единой цельной структурой.



**Рис. 1.** Полевые электронные изображения поверхности W-эмиттера после конденсации одного монослоя Si при различных температурах  $T_s$  подложки: *a* — поверхность чистого W; *b* — поверхность после конденсации одного монослоя Si при  $T_s = 650$  К; *c* — после конденсации одного монослоя Si при  $T_s = 1200$  К.



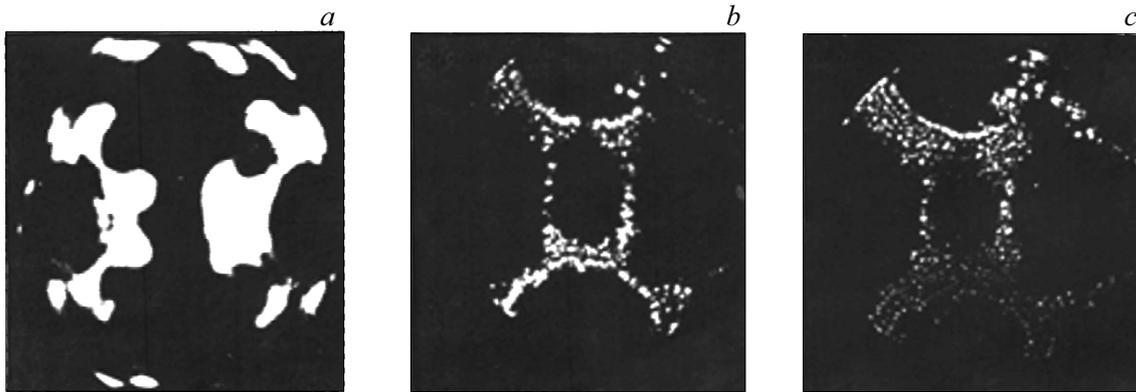
**Рис. 2.** Полевые электронные изображения поверхности W-эмиттера после конденсации различных количеств  $n$  монослоев Si при различных температурах  $T_s$  подложки: *a* — после конденсации  $n = 5$  монослоев Si при  $T_s = 650$  К; *b* — после конденсации одного монослоя Si при  $T_s = 1200$  К и последующей конденсации  $n = 250$  монослоев Si при  $T_s = 650$  К; *c* — после конденсации одного монослоя Si при  $T_s = 1200$  К и последующей конденсации  $n = 300$  монослоев Si при  $T_s = 650$  К.

рой поверхностного силицида. Однако, в конце концов, неполная изоморфность и накапливание структурных несоответствий приводит к формированию собственных кристаллитов Si. Следовательно, в данном случае реализуется механизм роста Франка–Ван дер Мерве. Хотя W и Si неизоморфны, однако реконструкция поверхности W делает возможным формирование на ней значительного количества (более 200) псевдоморфных слоев как переходной стадии от чистого W к чистому Si [10]. Низкотемпературный монослой и поверхностный силицид различаются между собой также и по своим электронным свойствам. В случаях осаждения как при  $T = 650$  К, так и при  $T = 1200$  К адсорбция Si вызывает плавное повышение средней работы выхода вольфрама  $\phi$ , при этом наблюдается максимум при  $n = 1$ , однако в случае низкотемпературного монослоя  $\phi_{\max} = 4.95$  eV, затем  $\phi$  плавно падает до  $\phi = 4.85$  eV, соответствующей среднему значению  $\phi$  для Si при покрытии  $n \geq 2$ , тогда, как в случае поверхностного силицида, величина  $\phi_{\max} = 4.95$  eV далее не меняется с ростом покрытия,

так как весь сверхмонослойный кремний диффундирует в объем W вплоть до формирования объемного силицида  $WSi_2$  [11]. Подобную же картину наблюдали и авторы работы [2].

## 2.2. Сверхмонослойные покрытия кремния

При  $T \geq 900$  К уже наблюдается заметная диффузия атомов Si в объем W. Объемная диффузия действительно имеет место лишь при сверхмонослойных покрытиях, как это отмечалось и в работе [2], и процесс объемной диффузии приводит к образованию объемного силицида  $WSi_2$ . Образование силицида происходит наиболее интенсивно в областях граней куба  $\{100\}$ , где параметры VCC решетки W,  $a = 0.316$  nm и тетрагональная плотноупакованная решетка  $WSi_2$ ,  $c = 0.322$  nm наиболее близко совпадают. В этом случае, также как и в случае адсорбции углерода на W, вначале формируется структура так называемого „ребристого кристалла“ [11], который можно охарактеризовать как первую стадию



**Рис. 3.** Полевые электронные (*a*) и ионные (*b, c*) изображения поверхности в процессе полевого испарения объемного силицида  $\text{WSi}_2$  при  $T_s = 77$  К. *a* —  $T_s = 1200$  К,  $n = 3$ ; *b* —  $U = 17$  кВ (изображающий газ — неон); *c* —  $U = 19$  кВ (изображающий газ — неон).

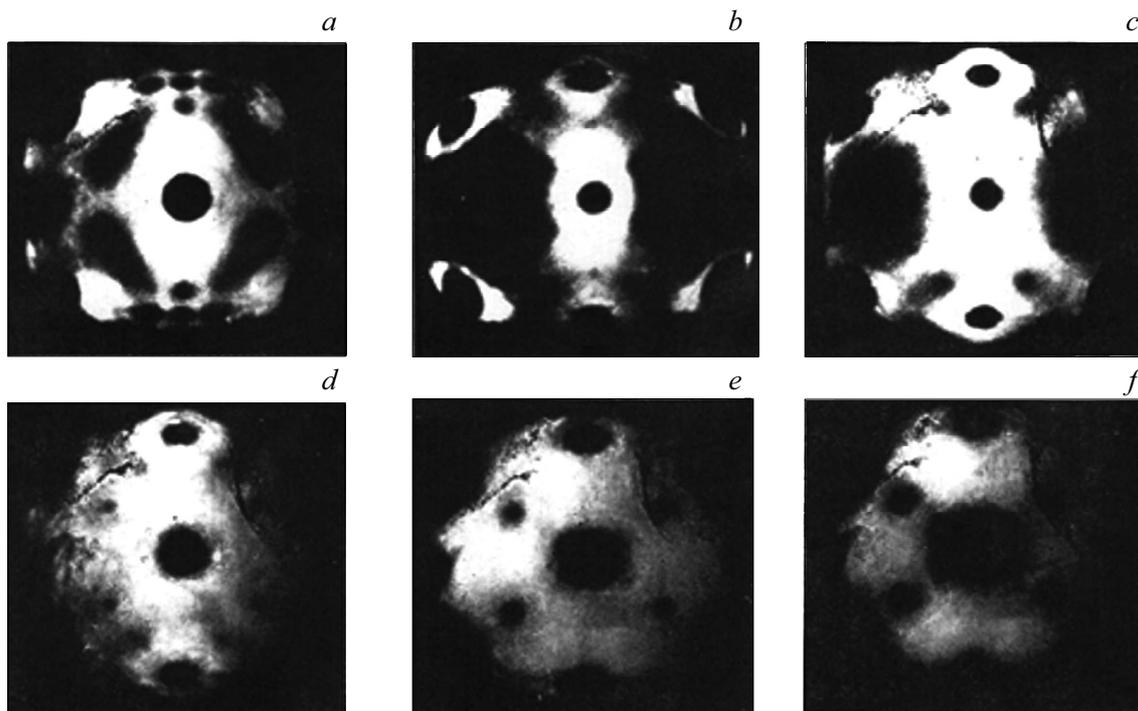
силицидообразования  $\text{W}$  поскольку ОЦК решетка  $\text{W}$  не может скачком перестроиться в ГСР-решетку  $\text{WSi}_2$ . Полевое электронное изображение поверхности объемного силицида  $\text{WSi}_2$  показано на рис. 3, *a*. Силицид  $\text{WSi}_2$  удобно получать, сконденсировав предварительно несколько монослоев  $\text{Si}$ , при комнатной  $T_s$ , а затем кратковременно прогреть эмиттер при  $T_s = 1000$ – $1300$  К. При этом если долго выдерживать структуру  $\text{WSi}_2$  при  $T = 1300$  К, то объемный силицид растворится, и на поверхности будет наблюдаться картина поверхностного силицида, который всегда предшествует образованию  $\text{WSi}_2$  при напылении  $\text{Si}$  и всегда предшествует получению чистого  $\text{W}$  при прогреве объемного силицида. На рис. 3, *b, c* показаны полевые ионные изображения поверхности силицида, который был получен конденсацией  $n = 5$  при  $T_s = 1200$  К с разрешением, близким к атомарному. Полевое испарение поверхности силицида показывает наличие узких ребер моноатомной ширины в областях центральной грани  $\{110\}$ , а в областях  $\{100\}$ , где толщина слоя силицида больше, можно насчитать 5 моноатомных ступеней.

С помощью графика Аррениуса для скорости диффузии  $\lg v = f(1/T)$  были определены энергия активации объемной диффузии  $\text{Si}$ , подобный график дал величину энергии  $Q_{\text{dif}} = 2.85$ – $0.05$  эВ и предэкспоненциальный множитель  $\tau_0 = 3 \cdot 10^{-10}$  с. Близкую по значению величину  $Q = 3.0$ – $3.1$  эВ получили и авторы работы [2], но в предположении изначально принятого „теоретического“ значения величины предэкспоненциального множителя для процесса поверхностной диффузии  $\tau_0 \sim 10^{-13}$  с, однако подобная величина предэкспоненты наблюдается далеко не всегда (результат настоящей работы — еще одно тому подтверждение), поэтому пользоваться экспериментально определяемой величиной  $\tau_0$ , на наш взгляд, все же предпочтительнее. Метастабильный характер слоя  $\text{WSi}_2$ , выросший в приповерхностной зоне острейшего эмиттера, подтверждается тем обстоятельством, что количество сконденсированных монослоев  $\text{Si}$ , кото-

рое необходимо для образования  $\text{WSi}_2$ , резко возрастает с ростом  $T$  острия. Если при  $T_s = 900$  К достаточно уже сконденсировать всего только  $n = 1.2$  монослоя для получения начальной стадии образования  $\text{WSi}_2$ , то в случае роста  $T_s$  до  $1300$  К для этого необходимо уже более 50 монослоев, поскольку объемная диффузия резко понижает концентрацию атомов  $\text{Si}$  в приповерхностной области  $\text{W}$ , и эта концентрация оказывается ниже предельной растворимости  $\text{Si}$  в матрице  $\text{W}$ .

### 2.3. Термическая стабильность и десорбция слоев $\text{Si}$

При температурах  $T_s > 1500$  К начинается процесс термической десорбции  $\text{Si}$  с поверхности. Десорбцию монослойного покрытия демонстрируют эмиссионные картины рис. 4, изменение этих картин происходит как бы обратно случаю конденсации. Вначале, при относительно низких  $T_s = 1600$ – $1750$  К (рис. 4, *a, b*) вновь возникают темные области граней  $\{111\}$ , грани  $\{013\}$  исчезают, но вокруг граней  $\{001\}$  формируются грани типа  $\{113\}$ , заканчивается эта стадия десорбции формированием эмиссионной картины, похожей на квазичистый  $\text{W}$  (рис. 4, *d*). Рост  $T_s$  до  $2100$  К приводит к полной десорбции  $\text{Si}$  с поверхности  $\text{W}$  (рис. 4, *f*). Графики Аррениуса для скорости десорбции показали, что наблюдаются две стадии десорбции — низкотемпературная — в интервале  $T_s = 1600$ – $1800$  К и высокотемпературная в интервале  $T_s = 1850$ – $2100$  К. Приводить экспериментальные графики Аррениуса для определения  $Q_{\text{des}}$  в виде двух прямых линий в координатах  $\lg v = f(1/T)$  необходимости видимо нет, но следует отметить только, что для первой стадии десорбции величина энергии активации десорбции  $Q_{\text{des}} = 5.18 \pm 0.02$  эВ, при этом предэкспоненциальный множитель равен  $\tau_0 = 6 \cdot 10^{-16}$  с, а для второй стадии величина  $Q_{\text{des}} = 5.82 \pm 0.04$  эВ и  $\tau_0 = 4 \cdot 10^{-13}$  с. То, что на первой стадии десорбции изменения происходят в основном в областях граней  $\{111\}$  не значит, конечно, что десорбция происходит именно из



**Рис. 4.** Полевые электронные изображения поверхности в процессе десорбции поверхностного силицида W: *a* — исходный поверхностный силицид; *b* — после прогрева эмиттера при  $T_s = 1600$  К; *c* — при  $T_s = 1715$  К; *d* — при  $T_s = 1830$  К; *e* — при  $T_s = 1900$  К; *f* — при  $T_s = 2100$  К.

этих областей. В условиях миграционного равновесия на поверхности, когда логарифмы концентраций адсорбата на разных гранях пропорциональны теплотам испарения с этих граней, десорбция происходит со всей поверхности. Наличие же двух стадий десорбции говорит о том, что на поверхности W при покрытиях, близких к монослою, существуют адсорбционные места для адатомов Si с большей или меньшей связью с поверхностью W, т.е. сильно и слабосвязанные места. Причем при монослойном покрытии поверхностного силицида объемная диффузия не происходит вообще, этот факт также обнаружили авторы работы [2] с помощью методики ожеспектроскопии. На первый взгляд этот факт кажется несколько удивительным — отсутствие объемной диффузии при наличии огромного градиента концентрации (на поверхности концентрация  $n = 10^{15}$  ат/см<sup>2</sup>, а во втором слое W на расстоянии 0.3 нм концентрация  $n = 0$ ) и это при достаточно высоких температурах  $T_s \sim 1400$  К. При этом атомы Si, оказавшиеся во втором слое, „тонут“ в объем W уже при  $T_s \geq 900$  К.

Эксперименты по изучению термической стабильности поверхностного силицида показали, что при длительном (десять минут) прогреве его при  $T \leq 1300$  К никакого изменения эмиссионной картины, а также и изменения работы выхода поверхности не происходит. Рост  $T_s$  до 1370 К (всего на 1500 ниже  $T$  начала заметной десорбции) вызывает после длительного прогрева в течение десятков минут падение исходной  $\phi$

всего на  $\Delta\phi = 0.10\text{--}0.12$  eV и очень слабое изменение эмиссионной картины поверхности.

Таким образом, в случае конденсации Si на поверхности W действительно образуется сильносвязанное состояние поверхностного силицида W. Формирование этого состояния заканчивается тогда, когда все свободные связи атомов на поверхности оказываются насыщенными, а это происходит при достижении состояния геометрического монослоя при поверхностной концентрации  $n \sim 1 \cdot 10^{15}$  ат/см<sup>2</sup>. Энергия активации объемной диффузии для атомов из этого состояния оказывается близкой, а возможно даже и большей теплоты десорбции атомов Si с поверхности W, поэтому атомы Si из состояния поверхностного силицида участия в объемной диффузии не принимают. Надо отметить, что подобные сильно и слабосвязанные состояния наблюдались и ранее на других адсорбционных системах. Так, в диссертационной работе Джалилова [12] наблюдалось в случае адсорбции кислорода на тантале Ta и ниобие Nb также два состояния для атомов O — сильно и слабосвязанные, при этом эффект был даже сильнее, чем для системы Si—W. Кислород из сильносвязанного состояния первого монослоя не участвовал в объемной диффузии, а только десорбировался с поверхности Ta при  $T \geq 2500$  К, тогда как атомы O из слабосвязанного состояния второго слоя диффундировали в объем Ta уже при  $T \geq 400$  К.

Можно при этом предположить, что адатомы Si диффундируют в объем W не по обычному прыжковому механизму, а по механизму обмена или замещения.

Суть подобного механизма в данном случае состоит в том, что адатом из второго слоя Si ныряет в первый слой поверхностного силицида, занимает там место и выпихивает атом из первого слоя в объем W. Подобного рода механизм впервые был экспериментально обнаружен Эрлихом и Ригли [13] много лет назад с помощью полевой ионной микроскопии и теоретически обоснован Фейбельманом [14], который показал, что для случая диффузии одиночного адатома Al на грани {100} Al энергия активации объемной диффузии по обменному механизму оказывается на 1/3 меньше чем энергия активации диффузии по обычному классическому прыжковому механизму. Подобный механизм диффузии был впоследствии подтвержден экспериментами с помощью полевой ионной микроскопии и атомного зонда [15–16]. Однако в работе [17] было показано, что хотя обменный механизм и требует меньшей энергии активации, но он реализуется не всегда. Такой механизм требует согласованного движения поверхностного атома и атома подложки, а для этого поверхностному атому необходимо быть в адсорбированном положении определенное время. Вследствие этого вместо обменного механизма часто реализуется прыжковый, хотя он и требует большей энергии активации.

## Заключение

1. Таким образом, кремний, адсорбированный на поверхности вольфрама может быть структурно в трех состояниях — аморфный слой при низких  $T_s$ , низкотемпературный монослой, примерно повторяющий структуру поверхности W при более высоких  $T_s$  и при самых высоких  $T_s$  — поверхностный силицид — монослой, связанный с реконструкцией поверхности подложки и появления на ней новых граней.

2. Главный вывод работы состоит в том, что на одной и той же исходной поверхности W при одной и той же ее температуре  $T_s$  и в случае конденсации одного и того же адсорбата Si могут реализовываться различные механизмы роста, приводящие к совершенно различным конечным результатам в зависимости от того, в каком состоянии находится исходная поверхность покрытой монослоем адсорбата Si подложки W. Собственные кристаллиты Si на W можно получить при конденсации Si как начиная с 3 монослоев, так и начиная примерно с 300 монослоев в зависимости от состояния поверхности W, покрытой Si.

3. На поверхности W адатомы Si могут существовать в двух состояниях — сильно и слабосвязанном. Состояние поверхностного силицида является сильносвязанным и адатомы из такого состояния не принимают участия в объемной диффузии, поскольку энергия активации такого процесса может быть близкой, а, возможно, даже и больше энергии десорбции Si с поверхности W.

4. Объемная диффузия осуществляется атомами второго слоя адсорбата Si скорее всего не по прыжковому

механизму диффузии, а по механизму обмена, когда адатом второго слоя занимает место в первом слое, выпихивает адатом первого слоя в объем W.

## Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Flaim T.A., Ownby P.D. // Surf. Sci. 1972. Vol. 32. N 3. P. 519–526.
- [2] Gall N.R., Rutkov E.V., Tontegode A.Ya. // Thin Solid Films. 1995. Vol. 266. P. 229–238.
- [3] Tsong T.T., Wang S.C., Liu H.F. // Journ. Vac. Sci. Tech. 1983. B1. P. 915–922.
- [4] Tsong T.T. // Surf. Sci. Rep. 1988. Vol. 8. N 3/4. P. 127–207.
- [5] Nishikawa O., Tomori M., Iwawaki F. // Surf. Sci. 1992. Vol. 266. P. 204–213.
- [6] Svec M., Napala P., M. Vondracek M., Merino P., Banca Rey M., Mutombo P., Polyak Y., Chab V., Yelinec P. // Phys. Rev. 2014. B 89. P. 291912.
- [7] Aufrei B., Kara A., Vizzini S., Oughaddou H., Leandry C., Ealet B., Lay G. // Appl. Phys. Lett. 2016. Vol. 96. P. 183102.
- [8] Голубев О.Л., Кошторович Е.Л., Шредник В.Н. // ЖТФ. 1996. Т. 66. Вып. 3. С. 88–96.
- [9] Голубев О.Л. // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 6. С. 113–119.
- [10] Fowler R.H., Nordheim L. // Proc. Roy. Soc. 1928. Vol. 119. A781. P. 173–181.
- [11] Голубев О.Л. // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44. Вып. 23. С. 9–15.
- [12] Автореф. канд. дис. Джалилов С.Т. Исследование взаимодействия кислорода с тугоплавкими металлами (W, Ta, Nb, Ir) методом электронностимулированной десорбции. Л. ФТИ им. А.Ф. Иоффе АН СССР. 1977. 150 с.
- [13] Wrigley J.D., Ehrlich G. // Phys. Rev. Lett. 1980. Vol. 44. N 10. P. 661–663.
- [14] Feibelman P.J. // Phys. Rev. Lett. 1990. Vol. 65. N 6. P. 729–732.
- [15] Chonling Chen, Tsong T.T. // Phys. Rev. Lett. 1990. Vol. 64. N 26. P. 3147–3150.
- [16] Kellogg G.L., Feibelman P.J. // Phys. Rev. Lett. 1990. Vol. 64. N 26. P. 3143–3146.
- [16] Kellogg G.L. // Surf. Sci. 1992. Vol. 266. P. 18–23.