

УДК 537.533

© 1991

## ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРОННО-СТИМУЛИРОВАННОЙ ДЕСОРБЦИИ ИОНОВ $\text{Li}^+$ И $\text{Na}^+$ ОТ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛЕНКИ КРЕМНИЯ НА ВОЛЬФРАМЕ

*В. Н. Агеев, А. М. Магомедов, Б. В. Якишинский*

С помощью статического магнитного масс-спектрометра изучена электронно-стимулированная десорбция (ЭСД) ионов  $\text{Li}^+$  и  $\text{Na}^+$  с поверхности W-ленты, покрытой кремнием и подвергшейся температурной обработке. В адсорбционной системе W—Si—Na, содержащей 1 монослой кремния, в интервале температур 400—600 К происходит термическая перестройка субмонослойных пленок Na в более выгодное к ЭСД состояние. Выход ионов  $\text{Na}^+$  возрастает также при наличии на поверхности адсорбента пленок дисилицида вольфрама различной толщины. Отжиг подложки при температурах  $T > 1200$  К вызывает изменение структуры монослойной пленки кремния на вольфраме, приводя к более чем 20-кратному увеличению сечения ЭСД ионов  $\text{Na}^+$ . С другой стороны, выход ионов  $\text{Li}^+$  при ЭСД из системы W—Si—Li малочувствителен к состоянию кремниевой пленки. Полученные зависимости ЭСД могут быть объяснены на основе модели, учитывающей релаксацию локального поля поверхности.

Нами была исследована электронно-стимулированная десорбция (ЭСД) ионов  $\text{Li}^+$  и  $\text{Na}^+$  с поверхности вольфрама, покрытого монослоем кремния [1]. В отличие от других адсорбционных систем [2] в этой системе выход ионов оказался больше выхода нейтралей. Этот факт, а также зависимости выхода и кинетических энергий ионов от энергии электронов получили объяснение в рамках развиваемой нами модели ЭСД, которая учитывает релаксацию локального поля поверхности в процессе удаления ионов в результате кулоновского взрыва [3, 4]. В этой модели выход ионов определяется временем жизни положительных ионов на поверхности, массой десорбирующихся ионов и начальным расстоянием между отталкивающимися частицами.

Кремний, напыленный на поверхность вольфрама сверх монослойного количества, при температуре подложки  $T > 950$  К растворяется в объеме образца с образованием дисилицида вольфрама [5], что может изменять время жизни положительного иона кремния на поверхности и равновесное расстояние между адсорбированным щелочным металлом и кремнием. В связи с этим в настоящей работе исследована ЭСД ионов  $\text{Li}^+$  и  $\text{Na}^+$  в зависимости от количества напыленного кремния на поверхность вольфрама и температурной обработки подложки с целью выяснения чувствительности ЭСД к процессам взаимодействия кремния с вольфрамом.

### 1. Экспериментальная техника

Опыты выполнялись в статическом магнитном масс-спектрометре, совмещенном для анализа ионов по энергии с энергоанализатором с задерживающим электрическим полем [6]. Измерения ионных токов проводились в режиме счета отдельных импульсов с усреднением флюктуаций шума с помощью ЭВМ СМ-1420. Давление остаточных газов в приборе было менее  $10^{-9}$  Па.

В качестве мишени для электронной бомбардировки применялись текстурированные вольфрамовые ленты с преимущественным выходом на поверхность грани (100) размерами  $20 \times 2 \times 0,01$  мм с работой выхода  $\varphi_p = 4,65 \pm 0,05$  эВ. Ленты очищались от углерода высокотемпературным прогревом в атмосфере кислорода.

Кремний напылялся из прямоугольного штабика из кремния *p*-типа с концентрацией сурьмы  $\sim 5 \cdot 10^{18}$  ат./см<sup>3</sup> размером  $30 \times 1 \times 1$  мм, расположенного параллельно *W*-ленте. Количество напыленного кремния определялось по времени напыления при постоянном потоке, калибровка которого осуществлялась путем фиксации времени напыления, необходимого для увеличения работы выхода подложки на 0,43 эВ при 1500 К, соответствующего образованию монослоя кремния [7].

Напыление щелочных металлов производилось из прямонакальных испарителей, в которых окись лития восстанавливалась алюминием, а хромат натрия реагировал с цирконием. Градуировку потоков щелочных металлов осуществляли по временной зависимости изменения работы выхода мишени, измеренной методом контактной разности потенциалов, и по току поверхностной ионизации [4]. Для удаления с поверхности примесного фтора использовалось облучение электронами [1].

## 2. Результаты измерений

При напылении кремния на вольфрамовую ленту при  $T=300$  К на подложке растет неупорядоченная пленка кремния [5], и при количестве кремния больше монослойного покрытия ток ионов щелочных металлов при ЭСД становится неизмеримо малым при любых концентрациях напыленного металла. Равномерное монослойное покрытие вольфрама кремнием без заметного растворения кремния в объеме образца достигается напылением кремния на подложку при 1500 К [7]. Приповерхностные пленки дисилицида вольфрама различной толщины можно создавать напылением на *W*-ленту, покрытую монослоем кремния, определенного количества кремния с последующим отжигом подложки при 1100 К в течение 5 мин [5].

На рис. 1, 2 представлены зависимости  $q^+$  выхода ионов  $\text{Na}^+$  и  $\text{Li}^+$  от концентрации металла, напыленного на пленки дисилицида вольфрама различной толщины. Выход ионов как функция концентрации щелочного металла проходит через максимум. Для ионов  $\text{Na}^+$  выход  $q_m^+$  ионов в максимуме постепенно увеличивается более чем в 2,5 раза с ростом толщины силицидной пленки, достигая насыщения при растворении более трех монослоев кремния, причем концентрация щелочного металла, соответствующая максимуму  $q_m^+$ , не зависит от толщины силицидной пленки. Совершенно иначе ведут себя концентрационные зависимости выхода  $q^+$  ионов  $\text{Li}^+$ . После растворения только 0,5 монослоя кремния выход ионов  $\text{Li}^+$  в максимуме уменьшается на  $\sim 20\%$  по сравнению с монослойным покрытием и максимум смещается в область больших концентраций напыленного лития (рис. 2, кривые 1—3). При больших количествах растворенного кремния выход ионов  $\text{Li}^+$  плавно увеличивается без изменения положения максимума по оси концентраций.

Зависимости выхода  $q^+$  ионов  $\text{Li}^+$  и  $\text{Na}^+$  от энергии  $E$  электронов не зависят от толщины пленки силицида и качественно подобны аналогичным зависимостям для ЭСД этих ионов с поверхности вольфрама, покрытого монослоем кремния (рис. 3). В обоих случаях порог появления ЭСД ионов  $\text{Li}^+$  равен 133 эВ, а вторичный порог — 154 эВ; для ионов  $\text{Na}^+$  порог появления соответствует  $\sim 40$  эВ, а вторичные пороги проявляются при энергиях электронов  $\sim 80$ ,  $\sim 100$  и  $\sim 150$  эВ. Однако если для ионов  $\text{Li}^+$  относительный вклад в суммарный ток от различных порогов не зависит от толщины силицидной пленки и количества напыленного лития, то для ионов  $\text{Na}^+$  относительный вклад в ионный ток от ионов, образующихся при энергии электронов  $E < 100$  эВ, т. е. связанных с ионизацией остовных

уровней натрия, возрастает при переходе от монослоя кремния к силицидным пленкам и с уменьшением концентрации адсорбированного натрия.

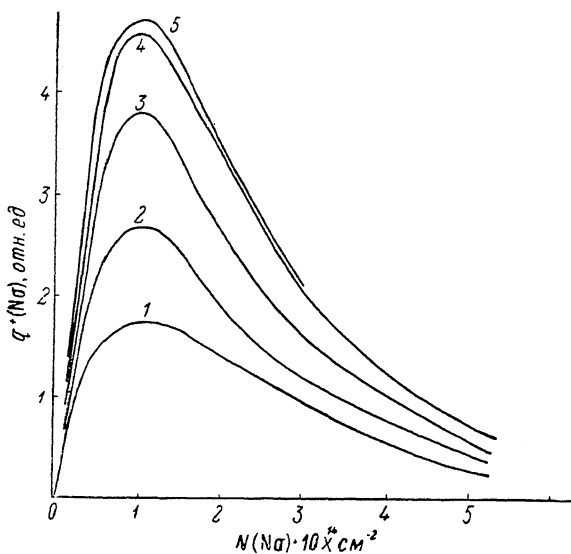


Рис. 1. Зависимости  $q^+$  выхода ионов  $\text{Na}^+$  от концентрации  $N$  натрия с поверхности  $\text{W-Si-Na}$ , содержащей 1 монослой  $\text{Si}$  (1) и пленки дисилицида вольфрама в количествах соответственно 1, 2, 3, 6 монослоев (2–5).  $E=300$  эВ,  $i_e=5 \cdot 10^{-6}$  А.

Выход ионов  $\text{Li}^+$  не зависит от температуры подложки вплоть до температур начала термодесорбции лития как в случае монослойного покры-

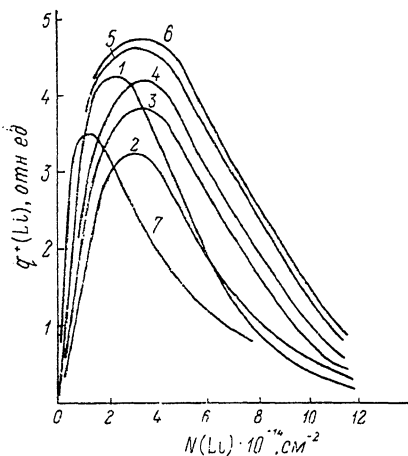


Рис. 2. Зависимости  $q^+$  выхода ионов  $\text{Li}^+$  от концентрации  $N$  лития с поверхности  $\text{W-Si-Li}$ , содержащей 1 монослой  $\text{Si}$  (1, 7) и пленки дисилицида вольфрама в количествах соответственно 0.25, 0.5, 1, 4, 6 монослоев (2–6).

7 — после отжига  $\text{W-Si}$  подложки при 1500 К в течение 30 мин.

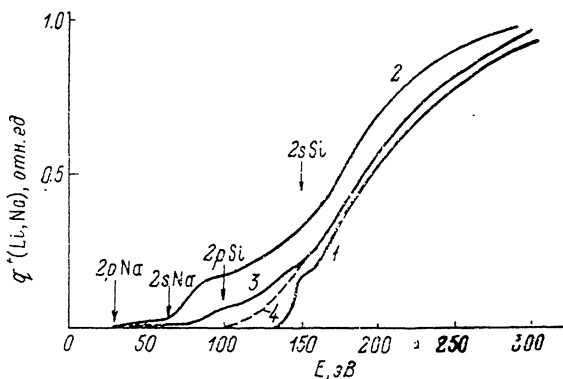


Рис. 3. Нормированные зависимости  $q^+$  выхода ионов  $\text{Li}^+$  (1) и  $\text{Na}^+$  (2) от энергии  $E$  бомбардирующих электронов при ЭСД с поверхности  $\text{W-Si-M}$ , содержащей 1 монослой кремния (3, 4) [1] и пленку силицида вольфрама (1, 2).

$N(\text{Li})=2 \cdot 10^{14}$ ;  $N(\text{Na})=10^{14}$  (2, 3),  $3 \cdot 10^{-14}$   $\text{см}^{-2}$  (4);  $i_e=2 \cdot 10^{-6}$  (1) и  $5 \cdot 10^{-5}$  А (2–4).

тия вольфрама кремнием [1], так и в случае образования силицидной пленки, а выход ионов  $\text{Na}^+$  обратимо увеличивается с ростом температуры  $T$  подложки, причем относительное увеличение тока больше для ЭСД с силицидной пленки, чем с вольфрама, покрытого монослоем кремния,

и при энергиях электронов  $E < 100$  эВ по сравнению с электронами с большими  $E$  (рис. 4).

Для поверхности вольфрама, покрытого при 1500 К монослоем кремния, обнаружен необратимый рост выхода ионов  $\text{Na}^+$  от времени выдержки

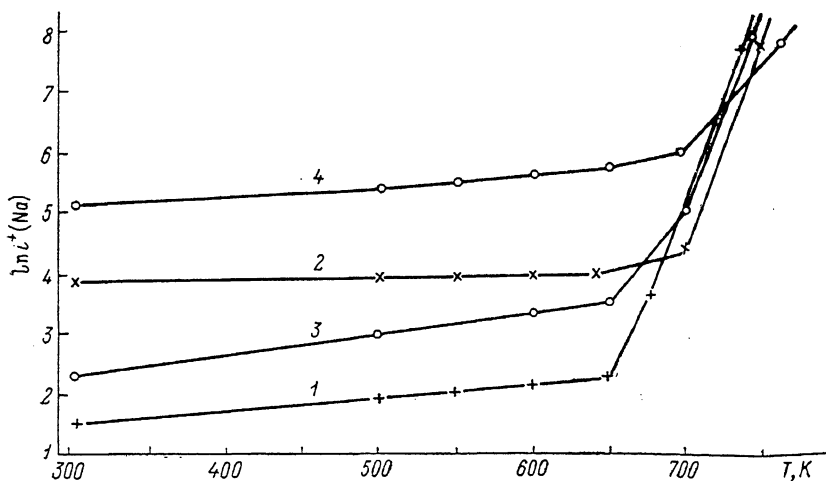


Рис. 4. Зависимости  $\ln i^+$  тока ионов  $\text{Na}^+$  от температуры мишени  $T$  при ЭСД из системы  $\text{W}-\text{Si}-\text{Na}$ , содержащей 1 монослой  $\text{Si}$  (1, 2) и пленку силицида вольфрама (3, 4).

$E=100$  (1, 3), 300 эВ (2, 4);  $i_e=10^{-4}$  (1, 3),  $5 \cdot 10^{-5}$  А (2, 4);  $\theta(\text{Na}) \approx 0.1$ .

образца при  $T > 300$  К. Этот эффект демонстрируют зависимости тока ионов  $\text{Na}^+$  от времени бомбардировки образца электронами для различных температур подложки при покрытии натрия  $\theta \approx 0.1$  (рис. 5). При  $T \leq 600$  К ток  $i^+$  ионов  $\text{Na}^+$  со временем монотонно стремится к насыщению

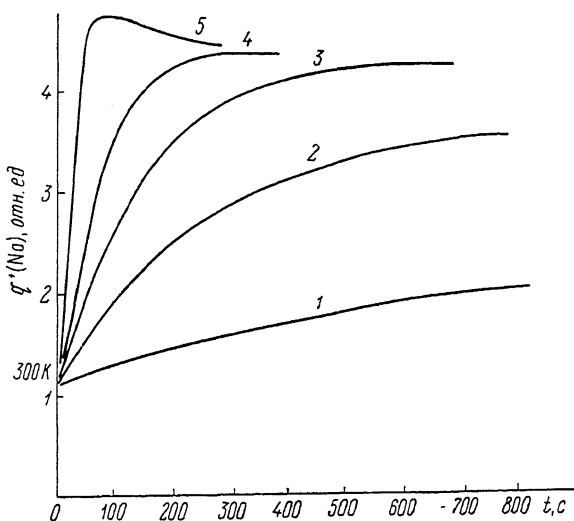


Рис. 5. Зависимости выхода  $q^+$  ионов  $\text{Na}^+$  из системы  $\text{W}-\text{Si}-\text{Na}$ , содержащей 1 монослой  $\text{Si}$ , от времени при температурах подложки  $T=500$  (1), 550 (2), 580 (3), 600 (4), 650 К (5).  $\theta(\text{Na}) \approx 0.1$ ,  $E=300$  эВ,  $i_e=10^{-5}$  А.

со скоростью, возрастающей с увеличением  $T$ . При  $T > 600$  К кривые  $i^+=f(t)$  проходят через максимум, по-видимому, связанный с началом термодесорбции натрия. Следует иметь в виду, что этот эффект является результатом только термической перестройки адсорбированного слоя и не зависит от дозы облучения, так как выключение бомбардировки электронами на некоторое время не изменяет скорости нарастания ионного тока.

Энергия активации этой перестройки оказалась  $\sim 0.63$  эВ, она сопровождается увеличением работы выхода, которое, например, при 550 К и  $\Theta(\text{Na}) = 0.1$  составляет  $\sim 0.06$  эВ. Интересно, что такая кинетика изменения тока не наблюдается при адсорбции натрия на силицидной пленке и монослойной пленке кремния на вольфраме, полученной при 1100 К, а также при ЭСД ионов  $\text{Li}^+$  независимо от количества напыленного кремния и температуры обработки подложки. После очистки поверхности от натрия и повторной его напылении кинетика изменения тока ионов  $\text{Na}^+$  воспроизводимо повторялась. Следовательно, этот эффект связан с перестройкой пленки натрия, а не подложки с кремнием.

С другой стороны, оказалось, что температурный отжиг может изменять и структуру монослойной пленки кремния на вольфраме, вызывая более чем 20-кратное увеличение сечения ЭСД ионов  $\text{Na}^+$ , однако для этого необходимы температуры прогрева  $T > 1200$  К. На рис. 6 приведены зависимости выхода  $q^+$  ионов  $\text{Na}^+$  от концентрации адсорбированного натрия для различных времен отжига монослойной пленки кремния при 1500 К, нанесен-

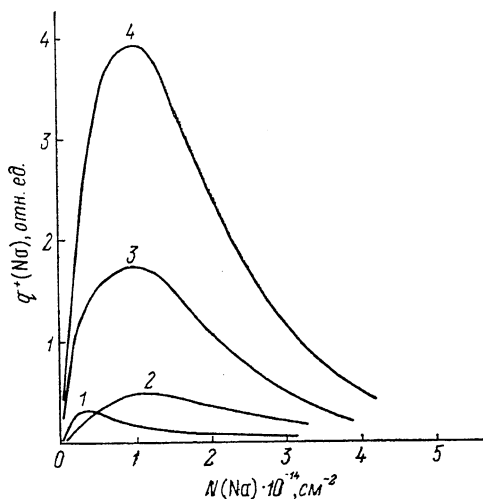


Рис. 6. Зависимости  $q^+$  выхода ионов  $\text{Na}^+$  от концентрации  $N$  адсорбированного  $\text{Na}$  при ЭСД с поверхности  $\text{W}-\text{Si}$ , содержащей 1 монослой  $\text{Si}$ , нанесенный при 1100 К (1), и прогретой при 1500 К в течение 5 (2), 20 (3) и 50 мин (4).  $\Theta(\text{Na}) \approx 0.1$ ,  $E = 300$  эВ,  $i_e = 2.5 \cdot 10^{-5}$  А.

ной при 1100 К. Видно, что в результате прогрева подложки при 1500 К максимум концентрационной зависимости выхода ионов  $\text{Na}^+$  смещается в область больших концентраций натрия, а выход ионов увеличивается с ростом продолжительности прогрева, постепенно достигая насыщения. Оценка изменения выхода ионов  $\text{Na}^+$  при ЭСД от температуры прогрева монослойной пленки кремния, напыленной при 1100 К, дает величину энергии активации перестройки монокристаллической пленки кремния на вольфраме  $\sim 0.3$  эВ. Следует заметить, что высокотемпературный отжиг монослойной пленки кремния на вольфраме сопровождается изменением работы выхода. Например, увеличение работы выхода подложки на  $\Delta\phi = 0.43$  эВ после напыления монослойного кремния при 1400 К [7] практически исчезает после отжига пленки в течение 30 мин. при 1500 К, а после охлаждения до 300 К работа выхода увеличивается на  $\Delta\phi = 0.27$  эВ за 10 мин. Повторный отжиг пленки при 1500 К уменьшает  $\Delta\phi$  почти до нуля уже за 5 мин, а увеличение  $\Delta\phi$  до 0.27 эВ происходит при 300 К снова за 10 мин. Следовательно, термическая перестройка пленки зависит от ее исходного состояния.

Интересно, что высокотемпературный отжиг монослоя кремния приводит к большим изменениям выхода  $q^+$  ионов  $\text{Na}^+$  при ЭСД (рис. 6), однако очень слабо влияет на ЭСД ионов  $\text{Li}^+$ . В результате отжига происходит лишь небольшое смещение максимумов зависимостей  $q^+ = f(N)$  в область меньших концентраций  $N$  адсорбированного лития (в случае натрия смещение максимума происходит в противоположном направлении) с одновременным уменьшением выхода на 15–20 % (рис. 2). Как следствие, выход ионов  $\text{Na}^+$  и  $\text{Li}^+$  с такой поверхности становится практически одинаковым, несмотря на экспоненциальную зависимость поперечных сечений ЭСД ионов от массы [4].

Вообще влияние отжига пленки кремния на выход ионов  $\text{Na}^+$  при ЭСД зависит от количества напыленного кремния (рис. 7). При покрытии

кремния меньше монослойного отжиг пленки приводит к увеличению выхода ионов  $\text{Na}^+$ . Отжиг пленки с количеством кремния больше монослоя приводит к уменьшению выхода ионов  $\text{Na}^+$  с ростом температуры отжига.

### 3. Обсуждение результатов

Попытаемся рассмотреть зависимость выхода  $q^+$  ионов  $\text{Li}^+$  и  $\text{Na}^+$  при ЭСД от концентрации напыленного щелочного металла, количества напыленного кремния, температуры отжига подложки и приготовления адсорбированного слоя в рамках предложенной нами ранее модели ЭСД [3, 4]. Согласно этой модели, ЭСД ионов  $\text{Li}^+$  и  $\text{Na}^+$  происходит в результате кулоновского отталкивания от ионов  $\text{Si}^+$  или  $\text{Si}^{2+}$ , образующихся

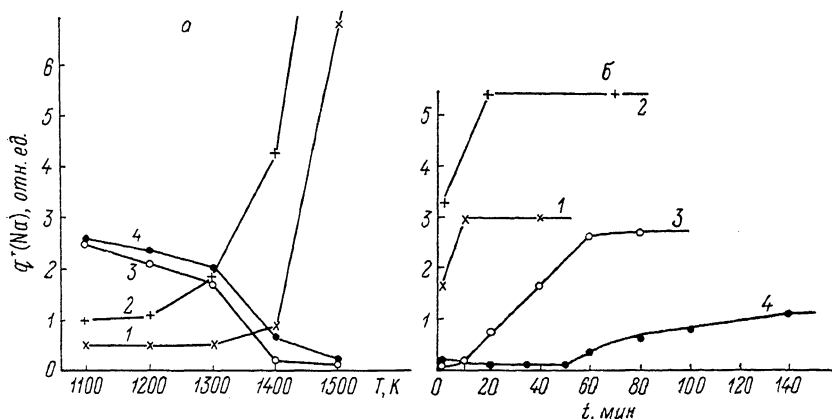


Рис. 7.

а — изменение выхода  $q^+$  ( $\text{Na}$ ) с поверхности  $\text{W-Si}$  в результате изохронного прогрета подложки по 5 мин при каждой температуре для  $\Theta(\text{Si})=0.5$  (1) и 1 (2) и пленок дисилицида вольфрама, содержащих соответственно 4 и 10 монослоев растворенного  $\text{Si}$  (3, 4). Исходная  $T$  нанесения  $\text{Si}$  пленки 1100 К.  $\Theta(\text{Na}) \approx 0.1$ ,  $E=300$  эВ,  $i_e=2.5 \cdot 10^{-3}$  А; б — дальнейшее изменение выхода  $q^+$  ( $\text{Na}$ ) во времени в результате отжига  $\text{W-Si}$  подложки при 1500 К (изотермический режим).

при внутри- и межатомных оже-процессах [1]. Это заключение подтверждается видом зависимостей выхода  $q^+$  ионов  $\text{Li}^+$  и  $\text{Na}^+$  от энергии бомбардирующих электронов  $E$ . Выход ионов  $\text{Li}^+$  и  $\text{Na}^+$  лимитируется временем жизни  $\tau$  ионов  $\text{Si}^+$  и  $\text{Si}^{2+}$  на поверхности, необходимым для преодоления десорбирующимися ионами сил зеркального изображения. Отсутствие ЭСД ионов щелочных металлов с пленки кремния сверхмонослойной толщины, напыленной на  $\text{W}$  при 300 К, является следствием неупорядоченности такой пленки [5] и соответственно малого времени жизни положительных ионов  $\text{Si}$ .

Колоколообразные зависимости выхода  $q^+$  ионов щелочных металлов от концентрации  $N$  напыленного металла, по-видимому, являются следствием латеральных взаимодействий в адслое, которые увеличиваются с увеличением доли ионности связи. Это подтверждается смещением максимума кривых  $q^+=f(N)$  в область меньших  $N$  при переходе от лития к натрию и цезию при ЭСД ионов этих металлов с вольфрама, покрытого монослоем кислорода [4]. Увеличение концентрации адсорбированных атомов вследствие деполяризации и расталкивания диполей приводит к увеличению равновесного расстояния  $x_0$  адчастиц от поверхности, что и приводит в конечном счете к уменьшению  $q^+$  выхода ионов из-за уменьшения кулоновского отталкивания между расталкивающимися ионами. Следовательно, фиксированное значение концентрации  $N$  натрия в максимуме кривых  $q^+=f(N)$  с увеличением толщины дисилицидной пленки (рис. 1) позволяет заключить, что равновесное расстояние  $x_0$  натрия от кремния не зависит от толщины этой пленки. С другой стороны, увеличение выхода  $q^+$  ионов  $\text{Na}^+$  при фиксированной концентрации  $N$  натрия

с увеличением толщины дисилицидной пленки в пределах трех монослоев растворенного Si является следствием роста времени жизни  $\tau$  положительных ионов Si на поверхности из-за меньшей плотности свободных электронов в силициде вольфрама по сравнению с вольфрамом. Аналогичный эффект наблюдается и при ЭСД ионов Li<sup>+</sup> (рис. 2). Однако в этом случае происходит смещение максимума кривой  $q^+ = f(N)$  в область больших концентраций  $N$  адсорбированного лития после растворения кремния в вольфраме. Это свидетельствует об уменьшении дипольного момента адсорбированного лития при образовании дисилицида вольфрама.

Качественное различие обнаружено также в ЭСД ионов Li<sup>+</sup> и Na<sup>+</sup> при термических воздействиях на адсорбированные пленки этих металлов и монослойное покрытие вольфрама кремнием. Выход ионов Li<sup>+</sup> не зависит от температуры  $T$  подложки, а выход ионов Na<sup>+</sup> обратимо увеличивается с ростом  $T$  так же, как это наблюдалось при адсорбции лития и натрия на вольфраме, покрытом монослоем кремния [1]. Увеличение  $q^+$  для натрия с ростом  $T$  возрастает при наличии дисилицидных пленок, что связано с увеличением  $\tau$  ионов Si<sup>+</sup> на поверхности в этом случае. Отсутствие температурной зависимости выхода ионов Li<sup>+</sup> объясняется слишком малым зарядом адатомов Li на кремнии, так как потенциал ионизации атома Li (5.39 эВ) больше работы выхода вольфрама с монослоем кремния (5.08 эВ). Хотя потенциал ионизации атома Na (5.14 эВ) тоже несколько больше работы выхода этой поверхности, присутствие поверхности приводит к некоторому уменьшению потенциала ионизации [8], что и обеспечивает положительный заряд натрия. Соответственно, ионы Na<sup>+</sup> могут десорбироваться после реверсивного движения и межатомного оже-процесса, а ионы Li<sup>+</sup> не могут, так как межатомный переход электрона вызывает их нейтрализацию. С увеличением  $T$  ад ионы Na<sup>+</sup> вследствие ангармонизма потенциальной адсорбционной ямы удаляются от поверхности и, следовательно, при движении к поверхности приобретают в поле сил изображения большую энергию, что и приводит к их большей вероятности ухода от поверхности за время  $\tau$  релаксации заряда на кремнии. Увеличение  $\tau$  в результате образования дисилицидных пленок усиливает температурную зависимость  $q^+$  выхода ионов Na<sup>+</sup>.

Помимо обратимого увеличения  $q^+$  ионов Na<sup>+</sup> с ростом  $T$ , связанного с изменением поперечного сечения ЭСД при реверсивном движении ионов, после напыления натрия при 300 К на поверхность вольфрама, покрытую монослоем кремния, наблюдается необратимое увеличение  $q^+$ , причем скорость увеличения  $q^+$  возрастает с ростом  $T$ . По-видимому, при 300 К на этой поверхности натрий обладает ограниченной подвижностью и адсорбируется в неравновесных положениях. При увеличении  $T$  натрий может переходить в равновесное состояние, характеризующееся меньшим расстоянием  $x_0$  адатомов от поверхности, что приводит к увеличению  $q^+$ . В пользу такого процесса указывают небольшое, на  $\sim 0.06$  эВ, увеличение работы выхода поверхности после отжига, а также смещение максимума зависимости  $q^+ = f(N)$  в область больших концентраций адсорбированного натрия. Отсутствие подобных необратимых эффектов при адсорбции натрия на дисилицидных пленках вольфрама и при адсорбции лития как на дисилицидных пленках вольфрама, так и на вольфраме, покрытом монослоем кремния, можно объяснить меньшей энергией связи адатомов с поверхностью в этих случаях и соответственно достаточной их подвижностью при 300 К.

Особенно существенные различия в ЭСД ионов Li<sup>+</sup> и Na<sup>+</sup> обнаружены от времени прогрева монослойной пленки кремния на вольфраме при  $T_{\text{н}} > 1200$  К. Выход ионов Na<sup>+</sup> очень сильно возрастает с ростом температуры отжига пленки кремния, а выход ионов Li<sup>+</sup> даже несколько уменьшается. В результате поперечные сечения ЭСД ионов Li<sup>+</sup> и Na<sup>+</sup> становятся практически одинаковыми, несмотря на экспоненциальное уменьшение выхода ионов с ростом их массы [2]. Это означает, что высокотемпературный отжиг пленки кремния на вольфраме вызывает ее перестройку, которая очень сильно влияет на выход ионов Na<sup>+</sup> и слабо на выход ионов Li<sup>+</sup>.

Следовательно, изменение выхода ионов  $\text{Na}^+$  в результате отжига пленки кремния не связано с изменением  $\tau$  времени жизни положительных ионов кремния, которое подобным образом должно было бы влиять на выход ионов  $\text{Na}^+$  и  $\text{Li}^+$ .

Изменение структуры субмонослойной пленки кремния на вольфраме при высокотемпературном отжиге проявляется также в изменении ее работы выхода, которая уменьшается практически до величин работы выхода чистой вольфрамовой ленты. На первом этапе отжига это приводит к уменьшению заряда адииона  $\text{Na}^+$ , так как потенциал ионизации натрия близок по величине к работе выхода пленки кремния на вольфраме до ее высокотемпературного отжига, а возрастание выхода  $q^+$  ионов  $\text{Na}^+$  в результате отжига подложки означает уменьшение расстояния  $x_0$  адиионов  $\text{Na}^+$  от поверхности [4]. Следовательно, первоначально высокотемпературная перестройка структуры подложки должна уменьшать латеральные взаимодействия в адслое натрия, связанные с дипольным отталкиванием. Это согласуется со смещением максимума кривой  $q^+=f(N)$  в область больших концентраций  $N$  адсорбированного натрия (кривые 1, 2 на рис. 6). Однако дальнейший рост  $q^+$  ионов  $\text{Na}^+$  от времени отжига пленки кремния происходит без изменения концентрации адсорбированного натрия, соответствующей максимуму на зависимости  $q^+=f(N)$ , и, следовательно, не сопровождается изменением латеральных взаимодействий в адслое.

Возможно, что это связано с компенсацией уменьшения расстояния  $x_0$  адииона  $\text{Na}^+$  от поверхности увеличением его заряда.

С другой стороны, заряд адиионов  $\text{Li}^+$  мал и практически не изменяется после отжига пленки кремния, так как потенциал ионизации лития больше работы выхода подложки. Однако небольшое понижение выхода  $q^+$  ионов  $\text{Li}^+$  и смещение максимума кривой  $q^+=f(N)$  для лития в область меньших концентраций  $N$  адсорбированного лития после высокотемпературного отжига субмонослойных пленок кремния свидетельствуют о небольшом увеличении  $x_0$  — равновесного расстояния адиионов от поверхности.

Термическая перестройка субмонослойных пленок кремния на вольфраме не является устойчивой, и после понижения температуры происходит релаксация перестроенной пленки, которая проявляется в увеличении работы выхода поверхности и уменьшении  $q^+$  выхода ионов  $\text{Na}^+$  при ЭСД. Увеличение температуры подложки и присутствие натрия замедляет релаксацию, и, например, при 600 К и покрытии поверхности натрием  $\Theta \simeq 0.1$  спада тока ионов  $\text{Na}^+$  при ЭСД не наблюдается.

К сожалению, имеющийся информации о термической перестройке субмонослойной пленки кремния на вольфраме недостаточно для построения конкретных структурных моделей перестроенного слоя и его релаксации. Однако ясно, что выход  $q^+$  ионов при ЭСД исключительно чувствителен к структуре адсорбированного слоя, как следует из модели ЭСД, учитывающей релаксацию локального поля поверхности [3, 4].

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Агеев В. Н., Бурмистрова О. П., Магомедов А. М., Якшинский Б. В. // ФТТ. 1990. Т. 32. № 3. С. 801—809.
- [2] Агеев В. Н., Бурмистрова О. П., Кузнецов Ю. А. // УФН. 1989. Т. 158. № 3. С. 389—416.
- [3] Агеев В. Н., Якшинский Б. В. // ФТТ. 1985. Т. 27. № 1. С. 99—105.
- [4] Ageev V. N., Burmistrova O. P., Yakshinskiy B. V. // Surf. Sci. 1988. V. 194. P. 101—114.
- [5] Агеев В. Н., Гомоюнова М. В., Пронин И. И., Хорунжий С. В. // Поверхность. 1988. В. 5. С. 57—63.
- [6] Агеев В. Н., Джалилов С. Т., Ионов Н. И., Потехина Н. Д. // ЖТФ. 1976. Т. 46. № 5. С. 1019—1029.
- [7] Агеев В. Н., Афанасьева Е. Ю., Галль Н. Р., Михайлов С. Н., Рутьков Е. В., Тонтегоде А. Я. // Поверхность. 1987. В. 5. С. 7—14.
- [8] Gurney R. W. // Phys. Rev. 1935. V. 47. P. 479.