

УДК 539.219.3:541.12.012.4

©1995

РОСТ ТОНКИХ СЛОЕВ КРЕМНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ НИОБИЯ

Е.Ю.Афанасьева, Н.Д.Потемкина, С.М.Соловьев

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Санкт-Петербург
Поступила в Редакцию 13 июля 1994 г.

С помощью оже-спектроскопии в области температур от 300 до 2000 К изучены начальные стадии формирования пленки кремния на поверхности теллурированных ниобиевых лент. Обнаружено, что при напылении Si на Nb при $900 < T < 1100$ К образуется силицид $NbSi_2$, рост которого при этих температурах происходит послойно вглубь образца. При больших температурах $1100 < T < 1200$ К в приповерхностной области вначале образуется силицид Nb_5Si_3 , а при $T > 1200$ К Nb_4Si , которые затем переходят в силицид $NbSi_2$. Образование силицида Nb_4Si происходит при $1200 < T < 1400$ К в результате структурного фазового перехода при напылении на поверхность Si в количестве $18.5 \cdot 10^{14}$ at./cm², а при $T > 1400$ К его рост происходит послойно.

Развитие микроэлектроники привело к необходимости систематических исследований физических и химических процессов, происходящих на границе металл-полупроводник. Взаимодействию тонких пленок металла с подложкой из полупроводникового материала посвящено значительное число публикаций [1,2]. Несмотря на это, не создано единой стройной теории, описывающей такое взаимодействие и позволяющей предсказать свойства тонкопленочных систем.

Мы считаем, что необходимым звеном в создании такой концентрации является исследование «обратных» систем, когда тонкие пленки полупроводника напыляются на подложку из металла. В нашей лаборатории проводились систематические исследования тонких слоев Si, напыленных на подложку из тугоплавких металлов VIII, VII, VI групп (Ir, Re, W) [3-5]. Они выявили ряд особенностей взаимодействия кремния с металлами, характерных для каждой из рассмотренных систем, а также их некоторые общие свойства, например способность проникать в объем металла лишь при достижении некоторой критической концентрации Si [3,4]. Вне нашего внимания оставались металлы V группы. Вместе с тем есть сведения, что именно с металлами V группы кремний может образовывать истинные соединения внедрения с самого начала их взаимодействия, в отличие от металлов VI-VIII групп [6].

Целью настоящей работы явилось поэтому изучение взаимодействия кремния и ниобия при напылении кремния на подложку из ниобия.

1. Методы исследования

Измерения проводились методом оже-спектроскопии. В качестве оже-спектрометра использовался 120° -й квазисферический четырехсечный энергоанализатор с задерживающим электрическим полем [3]. Адсорбентами служили текстурированные ленты Nb с преимущественным выходом граней (100) и размером $0.01 \times 1.5 \times 40$ mm.

Очистку от примесей и текстурирование лент проводили по стандартной методике [7] при $T \sim 2300$ К. Кремний напылялся на ленты из штабиков размером $1 \times 1 \times 25$ mm, нагреваемых постоянным стабилизированным током и расположенным с двух сторон параллельно ленте. В области высоких температур температуру лент определяли с помощью оптического микропирометра, а в области низких температур — путем линейной экстраполяции зависимости температуры от тока накала к комнатной температуре. Калибровка потоков осуществлялась по методу «кварцевых весов» [4].

Давление остаточных паров в приборе не превышало 10^{-10} Тор. Эксперименты проводились следующим образом. После высокотемпературного прогрева температура ленты снижалась до температуры адсорбции. Затем на образец напылялся кремний до выбранной концентрации. Далее температура ленты понижалась до комнатной и проводилась запись оже-спектра.

2. Результаты измерения

На рис. 1 представлены графики зависимостей интенсивности оже-сигналов Si (92 eV) и Nb (167 eV) от времени напыления кремния потоками $\nu = 6 \cdot 10^{13}$ (a) и $4 \cdot 10^{13}$ at./cm²·s (b) на поверхность Nb при различных температурах подложки. Кривые интенсивности оже-сигналов Si и Nb $I(t)$ в изученном интервале температур меняются в противофазе. При температуре подложки $T = 300$ К зависимости $I(t)$ для Si и Nb (кривые 1 и 1' на рис. 1, a) хорошо аппроксимируются прямыми линиями до $t = 15$ s. Это время соответствует количеству напыленного на поверхность кремния $N \sim 9.5 \cdot 10^{14}$ at./cm². При дальнейшем напылении Si изменение сигнала $I(t)$ замедляется и при $N > 13.5 \cdot 10^{15}$ at./cm² интенсивность оже-сигнала кремния выходит в насыщение, а интенсивность оже-сигнала ниобия падает до нуля.

При увеличении температуры подложки наклоны начальных участков графиков уменьшаются. При $T = 900$ К оже-сигналы Nb и Si (кривые 2' и 2 на рис. 1, a, b) перестают изменяться после напыления на поверхность Nb кремния в количестве $N = 15 \cdot 10^{15}$ at./cm² и кривые $I(t)$ выходят в насыщение.

При больших температурах $T > 1200$ К зависимости $I(t)$ становятся немонотонными (кривая 4 на рис. 1, a; кривые 5, 6 на рис. 1, b), на них наблюдаются ярко выраженные максимумы, после которых следует медленное увеличение интенсивности оже-сигнала Si. При больших дозах напыленного Si интенсивности оже-сигналов для всех кривых стремятся к одной величине, близкой к значению интенсивности в насыщении при температуре подложки $T = 900$ К.

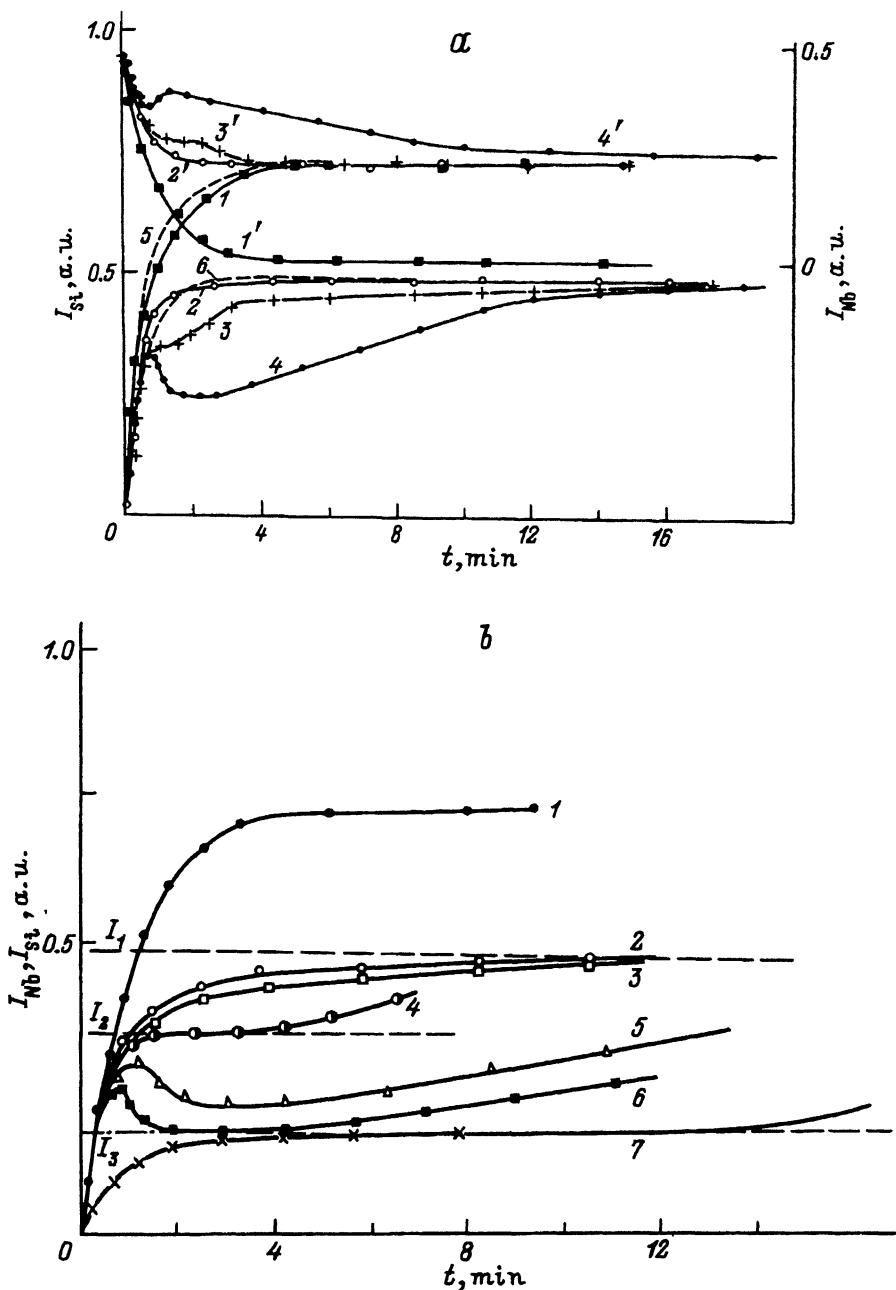


Рис. 1. Зависимости интенсивностей оже-пиков ниобия и кремния от времени напыления Si потоком $6 \cdot 10^{13}$ (a) и $4 \cdot 10^{13}$ at./cm² · s (b).

Температуры подложки T (K): a) 1, 1' — 300, 2, 2' — 900, 3, 3' — 1200, 4, 4' — 1270; b) 1 — 300, 2 — 900, 3 — 1050, 4 — 1200, 5 — 1270, 6 — 1350, 7 — 1450. Пунктирные линии 5, 6 (a) — кривые, рассчитанные из модели послойного роста.

При увеличении температуры подложки в интервале $1200 < T < 1450$ К значение интенсивности оже-сигнала Si в максимуме уменьшается, а сам максимум сдвигается в сторону малых времен напыления (кривые 5, 6 на рис. 1, б). При достаточно малых потоках атомов кремния и высоких температурах подложки максимум на кривых отсутствует (кривая 7 на рис. 1, б). Таким образом, уменьшение интенсивности оже-сигнала после достижения максимума наблюдается лишь на кривых, снятых при определенном соотношении между величиной падающего на поверхность потока Si и температурой подложки. Полученная нами немонотонная зависимость интенсивности оже-сигнала при непрерывном увеличении количества напыленного на подложку кремния отмечалась в литературе крайне редко [5, 8]. Поэтому нами были поставлены дополнительные эксперименты по выявлению физической причины этого явления. В этих экспериментах пленки Si, напыленные при $T = 1270$ К, отжигались при той же температуре в течение заданного времени, по истечении которого регистрировался оже-сигнал Si.

На рис. 2, а построена зависимость оже-сигнала Si от времени напыления потоком $\nu = 6 \cdot 10^{13}$ ат./см²·с при $T = 1270$ К (кривая 1). В каждой из точек, обозначенных на кривой 1 буквами, производился отжиг пленки Si в течение 5 мин. Зависимость интенсивности оже-сигнала Si после отжига предварительно напыленных пленок от времени запыления изображена на рис. 2, а (кривая 2).

После отжига сигнал от пленки Si, как и ожидалось, уменьшился, но неожиданным оказалось резкое уменьшение оже-сигнала после напыления на подложку количества Si, соответствующего точке D ($\sim 18.5 \cdot 10^{14}$ ат./см²) и следующих за ней точек.

Динамика изменения интенсивности оже-сигнала в разных точках напыления Si (A, B, ... H) в зависимости от времени отжига отражена на рис. 2, б. Из графиков рис. 2, б следует, что отжиг пленок (A, B, C) с малым количеством напыленного кремния приводит к медленному уменьшению оже-сигнала Si (92 eV). Напыление количества Si, большего $18.5 \cdot 10^{14}$ ат./см² (точки D и E вблизи максимума на кривой 1 на рис. 2, а), приводит к значительному увеличению скорости спада оже-сигнала во время отжига. Эта скорость спада остается высокой и при дальнейшем напылении Si (кривые F и H на рис. 2, б).

Интенсивность оже-сигнала $I(t)$ (рис. 2, б) перестает меняться после 4–6 мин отжига.

Величина $I(t)$ в условиях диффузии Si в объем подложки отражает относительное количество атомов Si в анализируемом слое (~ 10 атомарных плоскостей) в момент регистрации оже-сигнала. Поэтому стабилизация сигнала $I(t)$ на рис. 2, б свидетельствует о прекращении изменения концентрации Si в приповерхностной области, а следовательно, об отсутствии градиента концентрации и почти равномерном распределении Si в этой области.

Можно предположить, что увеличение скорости изменения интенсивности оже-сигнала Si при отжиге, наблюдаемое в точках F, E (кривые F и E на рис. 2, б), по сравнению с точкой C (кривая C на рис. 2, б) может быть связано с увеличением скорости ухода Si из анализируемой области вглубь подложки после достижения некоторой критической концентрации кремния в этой области. Для проверки этого предположения на поверхность подложки при $T = 1270$ К напылялся

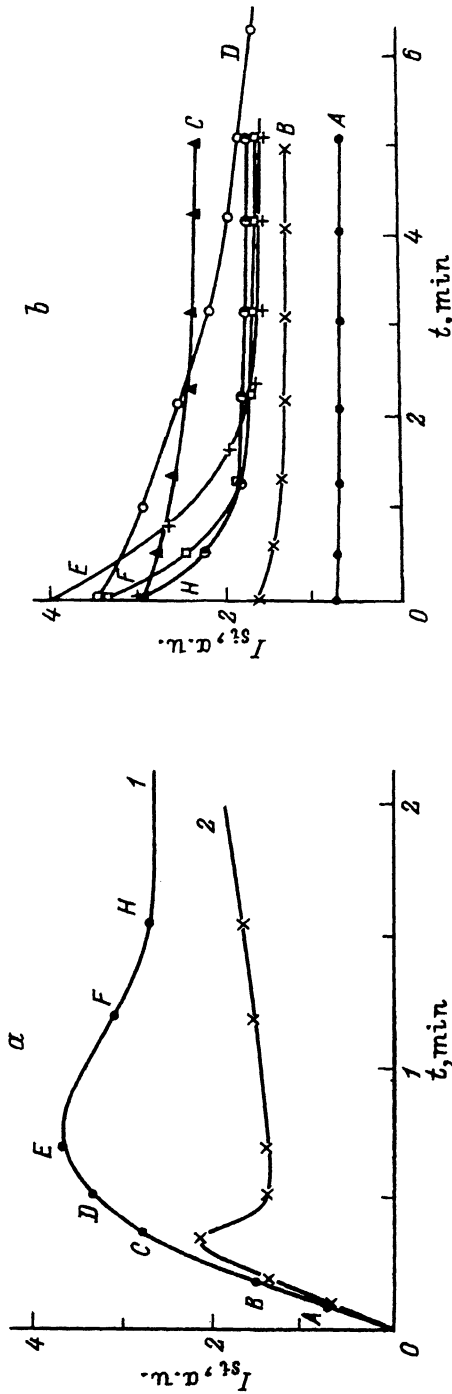


Рис. 2. а) Зависимости интенсивностей оже-пиков Si от времени напыления потоком $6 \cdot 10^{13}$ ат./см².s без отжига (1) и с последующим отжигом (2).

б) Зависимости интенсивностей оже-сигналов Si от времени отжига предварительно напыленных пленок Si, которым соответствуют точки А, В, С, D, E, F, H кривой 1.

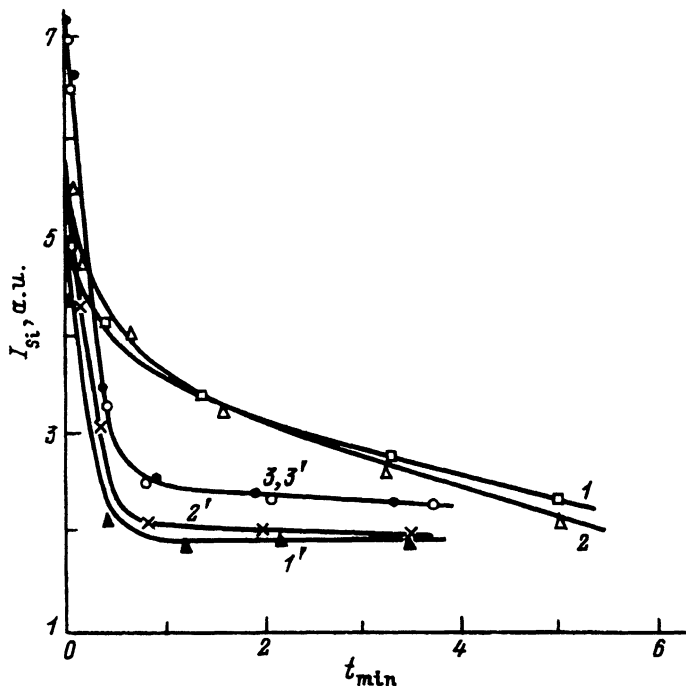


Рис. 3. Зависимости интенсивностей оже-пиков кремния от времени отжига пленок, напыленных на чистую Nb-подложку с концентрацией кремния (at./cm²): 1 — 14 · 10¹⁴, 2 — 17 · 10¹⁴, 3 — 23 · 10¹⁴ — и на подложку с предварительно выращенной пленкой (напыление Si до концентрации 30 · 10¹⁴ at./cm² и последующий отжиг при T = 1270 K в течение 5 min.) с концентрацией Si (at./cm²): 1' — 7 · 10¹⁴, 2' — 14 · 10¹⁴, 3' — 21 · 10¹⁴.
Температура напыления Si T = 300 K, температура отжига T = 1270 K.

кремний до концентрации $N \sim 30 \cdot 10^{14}$ at./cm², затем напыленная пленка отжигалась в течение 5 min при той же температуре. После отжига на полученную поверхность при комнатной температуре напылялось дополнительное количество атомов Si, и температура подложки поднималась до $T = 1270$ K. Изменение интенсивности оже-сигналов при отжиге таких пленок изображено на рис. 3 (кривые 1'–3').

Для сравнения на том же рисунке приведены кривые 1, 2, 3 изменения $I(t)$ во время отжига пленок Si, напыленных на чистую подложку при комнатной температуре. Из рис. 3 видно, что при малых количествах напыленного кремния ($N < 18.5 \cdot 10^{14}$ at./cm²) уход кремния в объем подложки происходит значительно быстрее, если на поверхности имеется отожженная пленка Si (кривые 1', 2') по сравнению с уходом Si с поверхности чистого Nb (кривые 1, 2).

Однако, когда на поверхности чистой подложки Nb количество напыленного Si превышает $18.5 \cdot 10^{14}$ at./cm², скорости изменения интенсивности в том и в другом случае совпадают (кривые 3 и 3').

Изменение интенсивности оже-сигналов Nb и Si при отжиге предварительно напыленной при $T = 300$ K пленки кремния до концентрации $N \sim 18 \cdot 10^{15}$ at./cm² изображено на рис. 4. По оси абсцисс отложена

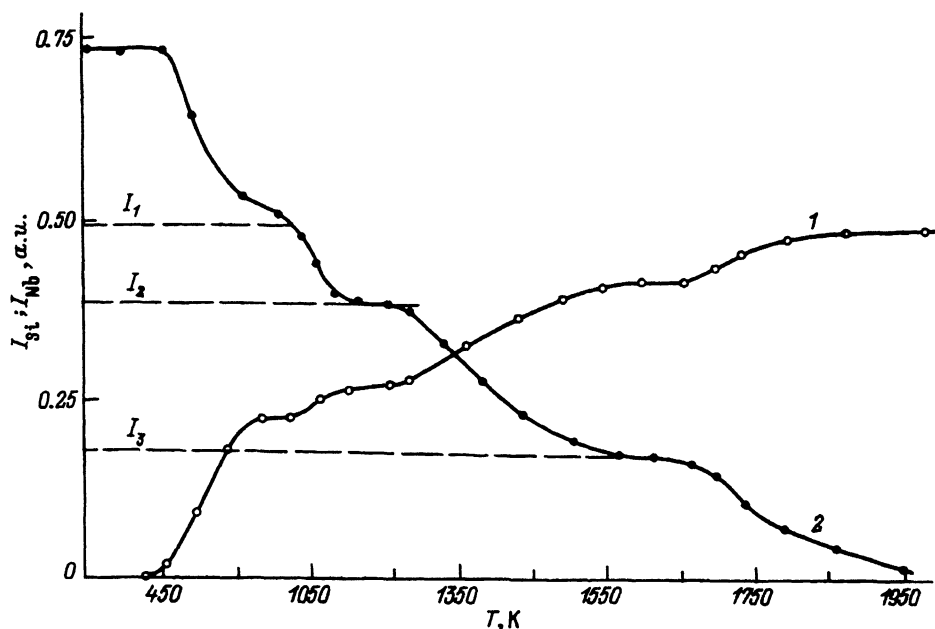


Рис. 4. Зависимости интенсивностей оже-пиков Nb (1) и Si (2) от температуры отжига при отжиге пленки Si, напыленной при температуре $T = 300$ К до концентрации $18 \cdot 10^{15}$ ат./см².

Длительность отжига в каждой точке — 1 мин.

температура отжига. На кривых $I(t)$ наблюдаются четко выраженные перегибы и участки, на которых интенсивности оже-сигналов как Si, так и Nb не изменяются.

3. Обсуждение результатов

Характер зависимости $I(t)$ интенсивности оже-сигнала подложки и адсорбата от времени напыления адсорбата связан с механизмом роста пленки последнего [8]. При послойном заполнении поверхности адсорбатом интенсивность оже-сигнала в пределах заполнения слоя меняется линейно и для n полностью заполненных слоев может быть записана в виде [9]

$$I_n = I_{Si}^{\infty} [F_{ab}] / 1 - e^{-na/\lambda}, \quad (1)$$

где n — число слоев адсорбата, a — геометрический размер адатома, λ — глубина выхода оже-электронов из подложки, I_{Si}^{∞} — значение интенсивности оже-сигнала от бесконечно толстого образца Si, $[F_{ab}]$ — матричный элемент, учитывающий вклад упругоотраженных электронов и шероховатость поверхности.

В этом случае зависимость $I(t)$ представляет собой ломаную линию с изломами в точках, соответствующих заполнению поверхности очередным слоем адсорбата. Анализ экспериментальной кривой $I(t)$ для оже-сигнала Si (92 eV) при температуре подложки $T = 300$ К (кривая 1 на рис. 1, а) показал, что она близка к расчетной для послойного роста (кривая 5 на рис. 1, а) при значении $a/\lambda = 0.35$.

Для этой же кривой до $t = 15$ с наблюдается линейное изменение интенсивности оже-сигнала со временем. В точке $t = 15$ с, что соответствует концентрации напыленного Si $N \sim 9.5 \cdot 10^{14}$ at./cm², наблюдается явно выраженное изменение наклона кривой, особенно заметное при изображении этого участка в увеличенном масштабе. Известно, что поверхностная концентрация атомов Nb на грани (100) составляет $9.3 \cdot 10^{14}$ at./cm². Поэтому можно считать, что монослойному покрытию атомов Si на грани (100) Nb соответствует концентрация $N = 9.3 \cdot 10^{14}$ at./cm².

Аналогичный рост пленки Si наблюдался нами ранее на подложках из W [4]. Но для W было получено лучшее согласие расчетной и экспериментальной кривых, что может быть следствием более равномерного по толщине заполнения поверхности W кремнием по сравнению с Nb.

Начальные участки зависимостей $I(t)$ для Si и Nb при напылении Si на Nb при $T \geq 900$ К отклоняются от таковых, полученных напылением при $T = 300$ К, что говорит о растворении Si в Nb при $T \geq 900$ К. Тот факт, что растворение Si в Nb наблюдается при $T \geq 900$ К с самого начала напыления Si, отличает Nb от W [4] и Ir [3], где растворение Si наблюдалось лишь после предварительного заполнения поверхности пленкой Si толщиной 1 и 2 мк для W и Ir соответственно.

В семействе зависимостей $I(t)$ (рис. 1, б) наблюдаются три плато с различным уровнем интенсивности оже-сигнала кремния I_1, I_2, I_3 . Постоянная интенсивность оже-сигнала говорит о постоянстве стехиометрического состава приповерхностной области подложки во время напыления Si. В специальных опытах было показано, что уровень оже-сигнала в этих областях мало зависит от потока атомов Si, поступающего на поверхность Nb, и определяется температурой подложки.

Из этих фактов следует, что при взаимодействии Si с Nb при разных температурах подложки образуются по крайней мере три соединения, имеющие различный стехиометрический состав.

Образование этих соединений мы наблюдаем и при отжиге толстых пленок Si (рис. 4). На кривых отжига (рис. 4) наблюдаются три температурные области: 1) $800 < T < 1000$ К; 2) $1100 < T < 1200$ К; 3) $1450 < T < 1660$ К, в которых интенсивности оже-сигналов Si и Nb меняются очень слабо. Интенсивность оже-сигнала кремния в этих областях соответствует интенсивностям оже-сигналов I_1, I_2, I_3 на плато рис. 1, б. Причем перекрываются также и температурные области, в которых наблюдаются плато на рис. 1, б и рис. 4.

Рентгенографические исследования [10] показали существование в системе Nb-Si трех индивидуальных химических соединений NbSi₂, Nb₅Si₃ и Nb₄Si. Поэтому вполне логичным нам кажется связать наблюдаемые нами плато на кривых (2, 4, 7 рис. 1, б и рис. 4) с образованием именно этих соединений Nb с Si соответственно. Плато на кривой 2 рис. 1, а можно связать тогда с образованием силицида NbSi₂. Монотонный характер зависимости $I(t)$ (рис. 1, а, кривая 2) и ее форма позволяют предположить, что образование соединения Nb с Si при $T = 900$ К происходит послойно.

Из литературы известна кристаллографическая структура соединения NbSi₂ [6]. Эта структура представляет из себя последовательность чередующихся слоев Si с количеством атомов $\sim 10^{15}$ at./cm² в

слое и Nb в количестве $0.5 \cdot 10^{15}$ at./cm², причем ряд атомов Si располагается на расстоянии $\sim 1/4$ постоянной решетки над атомами Nb.

Оже-сигнал Si от n слоев этого соединения с учетом чередования слоев Si и Nb на основании (1) может быть записан в виде:

$$I_n = I_1 \left(1 + e^{-2a/\lambda} + e^{-4a/\lambda} + \dots + e^{-2(n-1)a/\lambda} \right), \quad (2)$$

где $I_1 = I_{Si}^\infty [F_{ab}] (1 - e^{-a/\lambda})$ — интенсивность от первого слоя $\sim 10^{15}$ at./cm² атомов Si на Nb.

Экспериментальный параметр a/λ определялся из кривой 1 рис. 1, a по наилучшему соответствию формы экспериментальной и расчетной кривых и равнялся $a/\lambda = 0.35 \pm 0.05$. Используя значение I_1 ($t = 15$ s) из кривой 1 рис. 1, a мы рассчитывали кривую b рис. 1, a , которая удовлетворительно совпала с экспериментальной кривой 2 (рис. 1, a), таким образом мы получили, что при $T = 900$ K образуется силицид NbSi₂.

Стехиометрический состав образующегося соединения можно также рассчитать по известным интенсивностям оже-сигналов Si и Nb в насыщении путем сравнения оже-пигов Si на Nb при 300 K и в силициде, образовавшемся при 900 K, как это было сделано авторами работы [5] при изучении Si на Re.

Расчеты дают отношение $n_{Si}/n_{Nb} \sim 1.6$, что с достаточной точностью соответствует стехиометрии соединения NbSi₂.

Известная из литературы [2] температура образования соединения NbSi₂ $T = 900 \div 1000$ K для обращенной системы (напыление Nb на Si) совпадает с найденной нами.

При больших временах напыления кремния и $T \geq 900$ K интенсивность оже-сигналов Si (92 eV) и Nb (167 eV) для всех кривых $I(t)$ (рис. 1, a , рис. 1, b) стремится к значению интенсивности оже-сигналов соответствующих силициду NbSi₂, из чего следует, что этот силицид является конечной растущей фазой в системе Nb-Si. Однако, при $T > 900$ K рост этого соединения, по-видимому, происходит по другому механизму. Он скорее всего заключается в зарождении и разрастании отдельных зародышей фазы NbSi₂ на дефектах и границах зерен в приповерхностной области. Начало этого процесса хорошо заметно на кривых 3, 4 рис. 1, a , где после стабильного уровня интенсивности при $t > 80$ s для кривой 3 и $t > 150$ s для кривой 4 снова начинается его увеличение. При высоких температурах подложки $T = 1450$ K график зависимости интенсивности оже-сигнала Si от времени напыления (кривая 7 на рис. 1, b) до $t \sim 12$ min также хорошо описывается моделью послойного роста (расчетные точки на кривой 7).

Оценка стехиометрического состава соединения, образующегося при $T = 1450$ K, выполненного указанным выше способом [5], дала для отношения n_{Nb}/n_{Si} величину 4, что соответствует соединению Nb₄Si.

В наших экспериментах данное соединение образуется также при отжиге напыленных на Nb при $T = 300$ K пленок Si (рис. 4) в температурном интервале $1450 < T < 1650$ K, что совпадает с известными литературными данными [6,11] о стабильности этого соединения при высоких температурах.

Наличие плато в области температур $1100 < T < 1200$ К на кривых отжига 1 и 2 на рис. 4 указывает на существование силицида промежуточного стехиометрического состава. Можно предположить, что таким силицидом, по-видимому, является Nb_5Si_3 [6]. В условиях напыления Si на Nb при температуре подложки $T = 1200$ К (кривая 4 на рис. 1, б) этому соединению соответствует плато I_2 с той же интенсивностью оже-сигнала Si. Следует отметить, что рост этого силицида происходит в течение непродолжительного времени напыления Si, и при $t > 210$ с интенсивность оже-сигнала Si постепенно увеличивается до уровня, соответствующего силициду $NbSi_2$. При более высоких температурах подложки, $1200 < T < 1450$ К, зависимости $I(t)$ несут немонотонный характер с явно выраженным максимумом. Величина оже-сигнала в максимуме и на следующем за ним плато зависит от температуры подложки и от падающего потока атомов Si. Выяснению кинетики процессов, отраженных в немонотонном ходе кривых 5, 6 на рис. 1, б, служат также опыты с отжигом напыленных при $T = 1270$ К пленок Si (рис. 2, а, б). Отжиг в каждой точке проводился до тех пор, пока концентрация в приповерхностной области не переставала меняться, что наблюдалось при $t > 5$ min (рис. 2, б). Длительный последовательный отжиг пленки Si в каждой точке (A, B, C...) на кривой 1 (рис. 2, а) приводил к уходу Si с поверхности в объем, а также к уменьшению концентрации Si в приповерхностной области (кривая 2).

Однако при достижении критической концентрации кремния в приповерхностной области $\theta = \theta_{cr}$, соответствующей напылению кремния в количестве $N \approx 18.5 \cdot 10^{14}$ at./cm² (точка D кривой 1 на рис. 2, а), интенсивность оже-сигнала отожженной пленки Si резко уменьшается.

Учитывая, что в соответствии с условиями опыта концентрация Si в приповерхностной области в каждой точке кривой 2 практически не меняется со временем, такое резкое изменение интенсивности на кривой 2 при переходе от точки C к точкам DE... можно связать только с изменением структуры приповерхностной области, т.е. со структурным фазовым переходом. При этом переходе меняется взаимное расположение атомов Nb и Si в приповерхностной области, возможно увеличивается экранировка атомов Si атомами Nb и уменьшается интенсивность оже-сигнала Si. В результате структурного фазового перехода уровень оже-сигнала отожженной пленки стабилизируется (кривая 2 на рис. 2, а). Величина этого уровня близка по значению к величине оже-сигнала I_3 на плато кривой 7 (рис. 1, б). Поскольку уровень оже-сигнала I_3 был идентифицирован нами как уровень оже-сигнала, соответствующий силициду Nb_4Si , можно предположить, что и в случае структурного фазового перехода в приповерхностной области образуется низший силицид ниобия — Nb_4Si . Структурный фазовый переход сопровождается резким увеличением скорости диффузии кремния с поверхности сквозь приповерхностный слой, что видно из сопоставления кривых отжига C и E (рис. 2, б), а также кривых 1, 2 с кривыми 1', 2' (рис. 3). Этот факт подтверждает структурные изменения, происходящие в слое и приводящие к увеличению межплоскостных расстояний. Факт увеличения межплоскостных расстояний в решетке Nb при образовании силицидов известен в литературе [10,11].

Таким образом, спад интенсивности оже-сигнала Si, наблюдаемый на кривых 5, 6 (рис. 1, б), обусловлен двумя причинами: 1) структурным фазовым переходом в приповерхностном слое, происходящем по достижении определенной критической концентрации θ_{cr} кремния в нем и сопровождающимся уменьшением оже-сигнала от атомов Si; 2) уменьшением количества кремния, адсорбированного на поверхности, в результате его ухода в объем из-за роста коэффициента диффузии.

Следующий за максимумом постоянный уровень оже-сигнала Si определяется балансом падающего и диффузионного потоков и сильно зависит от величины падающего на поверхность потока атомов Si и температуры подложки.

Вопрос о том, в каком виде происходит накопление кремния до $\theta = \theta_{cr}$, довольно сложен. Возможны два варианта. Один из них — это внедрение атомов Si между атомами Nb без образования какого-либо соединения. Второй — возможное образование крайне неустойчивых зародышей фазы Nb_5Si_3 на дефектах кристаллической решетки. В дальнейшем при $\theta = \theta_{cr}$ происходит распад этого соединения и образование Nb_4Si . На возможность кристаллизации Nb_4Si из обогащенного ниобием расплава, содержащего α - и β -фазы Nb_5Si_3 , указывается в литературе [6].

Таким образом, взаимодействие Nb с Si в интервале температур $300 < T < 2000$ К носит достаточно сложный характер, зависящий не только от температуры подложки, но и от величины падающего на поверхность потока атомов Si. Конечной фазой взаимодействия является соединение $NbSi_2$, рост которого при температуре $T < 1100$ К происходит послойно от поверхности вглубь подложки.

Низший силицид ниобия, предположительно Nb_4Si , образуется по механизму послойного роста при высоких температурах $T > 1400$ К и не очень больших $\nu < 5 \cdot 10^{13}$ ат./см²·с потоках кремния. При температурах $1200 < T < 1400$ К образование силицида Nb_4Si происходит путем структурного фазового перехода по достижении критической концентрации кремния в приповерхностной области.

При температурах $1100 < T < 1200$ К на начальном этапе взаимодействия Si и Nb происходит образование силицида Nb_5Si_3 . Силицид неустойчив и в указанном интервале температур переходит в $NbSi_2$ при дозе напыленного Si, превышающей $8 \cdot 10^{15}$ ат./см².

При температурах $T > 1200$ К соединение Nb_5Si_3 в наших опытах не наблюдается. Либо этот силицид не образуется вовсе, либо зародыши фазы Nb_5Si_3 крайне не устойчивы и при дозе напыленного Si, превышающей $18.5 \cdot 10^{14}$ ат./см², переходят в силицид Nb_4Si .

Таким образом, нами впервые проанализирована кинетика взаимодействия напыленного Si с Nb и выявлена последовательность структурных фазовых переходов, и условия их возникновения.

Список литературы

- [1] Бехштедт Ф., Эндерлайн Р. Поверхности и границы раздела полупроводников. М.: Мир, 1990. 484 с.
- [2] Мьюрарка Ш. Силициды для СБИС. М.: Мир, 1986. 176 с.
- [3] Агеев В.Н., Афанасьева Е.Ю., Соловьев С.М., Григорьев А.К. // ФТТ. 1993. Т. 35. № 2. С. 486-491.
- [4] Агеев В.Н., Афанасьева Е.Ю., Галль Н.Р., Михайлов С.Н., Рутьков Е.В., Тонтегоде А.Я. // Поверхность. 1987. № 5. С. 7.
- [5] Галль Н.Р., Рутьков Е.В., Тонтегоде А.Я. // ЖТФ. 1990. Т. 60. № 4. С. 125-130.
- [6] Гольдшмидт Х.Дж. Сплавы внедрения. Т. 2. М.: Мир, 1971. 464 с.
- [7] Агеев В.Н. Докт. дис. Л.: ФТИ им.А.Ф.Иоффе, 1971. 287 с.
- [8] Argile C., Rhead G.E. // Sur. Sci. Rep. 1989. V. 10. N 6/7. P. 115.
- [9] Анализ поверхности методами оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии / Под ред. Д.Бригса и М.А.Сиха. М.: Мир, 1987. 598 с.
- [10] Самсонов Г.В., Нешпор В.С., Ермакова В.А. // ЖНХ. 1958. Т. 3. № 4. С. 868-878.
- [11] Алямовский С.Н., Гельд П.В., Матвеевко Н.И. // ЖНХ. 1962. Т. 7. № 4. С. 836-843.