

05; 06; 11; 12

РОСТ ТОНКИХ ПЛЕНОК КРЕМНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ТАНТАЛА И НИОБИЯ

© *Е.Ю.Афанасьева, С.М.Соловьев*

Взаимодействию кремния с металлами уделяется большое внимание в связи с развитием микроэлектроники. Несмотря на то, что равновесные фазовые превращения металл-кремний изучены достаточно хорошо, взаимодействие металла с кремнием в условиях, далеких от равновесия, трудно заранее прогнозировать. Однако именно с этим приходится сталкиваться при формировании тонких слоев силицидов способом напыления. Систематические исследования тонких слоев кремния, напыленных на подложку из тугоплавких металлов VIII, VII, VI групп, проведенные в работах [1,2], выявили ряд особенностей, 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.

Недостаточно изученными в этом смысле остались металлы V группы, типичными представителями которых являются Ta и Nb.

Экспериментальная техника

Измерения проводились методом Оже-электронной спектроскопии. В качестве Оже-спектрометра использовался 120-градусный квазисферический четырехсеточный анализатор с задерживающим полем [1]. Адсорбатами служили текстурированные ленты Nb и Ta с преимущественным выходом граней (100) и размерами $0.01 \times 1.5 \times 40$ мм. Очистку от примесей и текстурирование лент проводили по стандартной методике [3] при $T \sim 2300$ К для Nb и $T \sim 2600$ К для Ta. Кремний напылялся на ленты из штабиков размером $1 \times 1 \times 25$ мм, расположенных симметрично по обеим сторонам изучаемых лент. Это позволяло исключить влияние поверхностной миграции кремния на изучаемые процессы. Давление остаточных паров в приборе не превышало 10^{-10} Тор. Калибровка потоков атомов Si осуществлялась по методу "кварцевых весов".

Результаты измерения и их обсуждение

На рис. 1, а, б представлены зависимости интенсивностей Оже-сигналов Si(92 эВ), Nb(167 эВ), Ta(171 эВ) при отжиге в течение 1 мин предварительно напыленной при 300 К толстой ~ 20 мл ($1 \text{ мл} = 10^{-15} \text{ ат/см}^2$) пленки кремния от температуры отжига T . Как следует из кривых, начало изменения Оже-сигнала происходит при $T \sim 400$ К для Nb и при $T \sim 700$ К для Ta и T связано с началом растворения кремния в подложке. На кривых $I(T)$ наблюдаются четко выраженные участки с постоянным уровнем Оже-сигнала. Это обусловлено существованием устойчивых в определенных температурных интервалах химических соединений кремния с Nb и Ta неизменного стехиометрического состава. Стехиометрический состав соединений, оцененный по уровням интенсивности Оже-сигналов [4], показал, что эти соединения — NbSi_2 , Nb_5Si_3 , Nb_4Si и Ta_5Si_3 , Ta_4Si . Образование тех же соединений мы наблюдали и при последовательном напылении кремния на Ta и Nb при различных температурах.

Результаты этих опытов представлены на рис. 2, а, б. Как следует из формы кривых $I(t)$, полученных при $T = 300$ К, механизм роста пленки Si на Ta и Nb близок к послойному. Первый излом на зависимостях $I(t)$ при $T = 300$ К, соответствующий заполнению первого слоя подложки атомами Si как для Ta, так и для Nb наблюдается при концентрации кремния $\sim 9.5 \times 10^{15} \text{ ат/см}^2$. Это значение близко к концентрации атомов Nb и Ta на грани (100).

На зависимостях $I(t)$ рис. 2, а, б наблюдаются плато с различными уровнями Оже-сигналов кремния. Интенсивность Оже-сигнала в этих областях соответствует интенсивностям Оже-сигналов кремния на плато рис. 1, а, б. Причем перекрываются также и температурные области, в которых наблюдаются плато. Этот факт позволяет сделать вывод об образовании в этих двух случаях одних и тех же соединений. Механизм роста тонких пленок силицидов NbSi_2 , Nb_5Si_3 , Nb_4Si и Ta_5Si_3 , Ta_4Si близок к послойному в области низких температур $T < 1200$ К и при высоких $T > 1400$ К для ниобия и $T > 1700$ К для тантала. В промежуточной области температур $T \sim 1270$ К для Nb и $T \sim 1400$ К для тантала после достижения определенной критической концентрации атомов кремния в приповерхностной области происходит структурный фазовый переход, в результате которого образуются низшие силициды Nb_4Si и Ta_4Si .

Следствием такого перехода является резкое уменьшение интенсивности Оже-сигнала кремния в результате изменения стехиометрии приповерхностной области (рис. 2, а, кривая 4, 5; рис. 2, б, кривые 5, 6). Фазовый переход сопровождается резким увеличением скорости растворения крем-

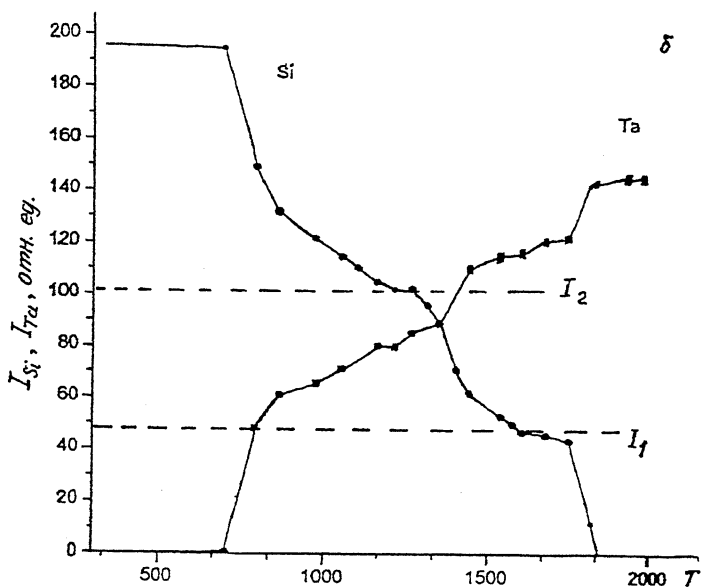
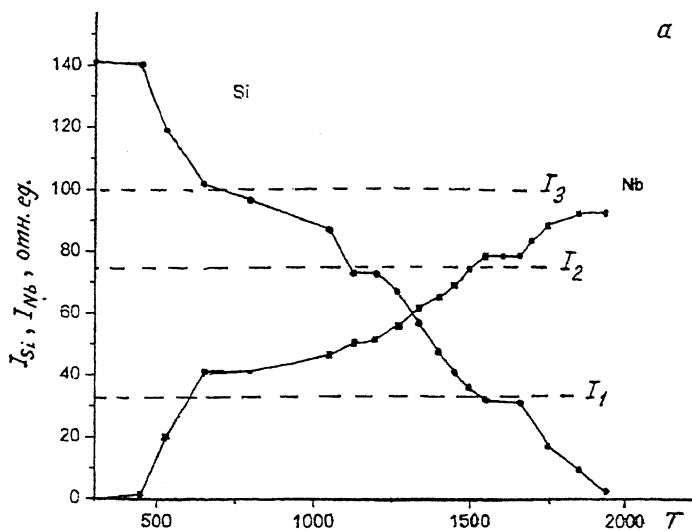


Рис. 1. Зависимости интенсивностей Оже-сигналов Si, Nb и Ta при отжиге мл предварительно напыленных на Nb (а) и Ta (б) пленок кремния ($\theta \sim 20$) от температуры отжига.

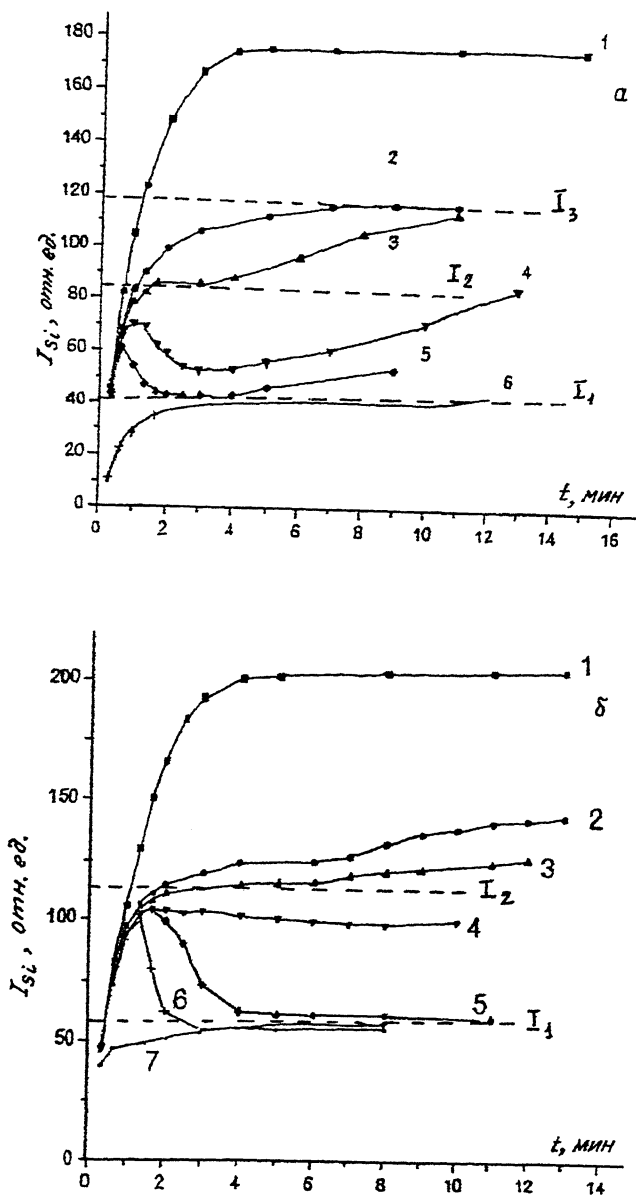


Рис. 2. Зависимости интенсивностей Оже-сигналов Si при напылении на Nb (а) и Ta (б) от времени напыления. Температуры подложки T (K): а — 300 (1), 900 (2), 1200 (3), 1270 (4), 1350 (5), 1450 (6); б — 300 (1), 1060 (2), 1220 (3), 1320 (4), 1360 (5), 1450 (6), 1750 (7).

ния в подложке. Это подтверждается тем, что скорость изменения интенсивности Оже-сигнала Si при отжиге пленки кремния, напыленной на чистую поверхность Nb и Ta, и такой же пленки, напыленной на предварительно выращенные силициды Nb₄Si и Ta₄Si, отличается, по крайней мере, на порядок.

Силициды Nb₄Si и Nb₅Si₃ не являются в наших условиях устойчивыми формами. После образования силицида Nb₄Si при дальнейшем напылении кремния на поверхность Nb интенсивность Оже-сигналов кремния начинает расти до уровня, соответствующего силициду NbSi₂ (рис. 2, а). Таким образом, конечной растущей фазой в системе Nb-Si является дисилицид NbSi₂.

В отличие от ниобия, при напылении кремния на Ta при соответствующих температурах наблюдается непрерывный рост силицидов Ta₅Si₃ и Ta₄Si, по крайней мере за время проведения эксперимента. Тем не менее взаимодействие Si с Nb и Ta имеют много общего. Механизмы роста силицидов Ta и Nb одинакового стехиометрического состава были одинаковыми. В области промежуточных температур силициды Nb₄Si и Ta₄Si образуются в результате структурного фазового перехода после достижения в приповерхностной области подложки критической концентрации атомов кремния.

Список литературы

- [1] Агеев В.Н., Афанасьев Е.Ю., Соловьев С.М., Григорьев А.К. // ФТТ. 1993. Т. 35. № 2. С. 486-491.
- [2] Агеев В.Н., Афанасьева Е.Ю., Галль Н.Р., Михайлов С.Н., Рутыков Е.В., Тонтегоде А.Я. // Поверхность. 1987. № 5. С. 7.
- [3] Агеев В.Н. Докт. дис. Л.: ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 1971. 287 с.
- [4] Анализ поверхности методами оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии / Под ред. Д. Бригса и М.А. Сиха. М.: Мир, 1987. 598 с.

Поступило в Редакцию
16 ноября 1995 г.