

УДК 621.793.162

Д. Н. Придачин, М. В. Якушев, Ю. Г. Сидоров, В. А. Швец

(Новосибирск)

**ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ АДСОРБЦИИ ТЕЛЛУРА НА КРЕМНИИ
МЕТОДАМИ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ,
ДИФРАКЦИИ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ
И ОЖЕ-СПЕКТРОСКОПИИ**

Методами эллипсометрии, дифракции быстрых электронов (ДБЭ) и электронной оже-спектроскопии изучались процессы адсорбции и десорбции теллура и мышьяка на поверхности кремния (113). Установлено, что невозможно существование сплошных монослойных покрытий Te на поверхности кремния, а адсорбированный Te может присутствовать только в виде отдельных островков и только до температуры подложки 450 °С. Теоретически определены и экспериментально подтверждаются условия, при которых возможно осаждение элементарного теллура. Подтвердить экспериментально возможность образования фазы Si_2Te_3 и сплошного слоя теллура на поверхности не удалось, по-видимому, из-за введения поверхностных состояний, уменьшающих суммарную энергию взаимодействия адсорбируемого вещества с поверхностью. Определено, что возможно существование сплошных монослойных покрытий мышьяка на поверхности кремния до температуры подложки 600 °С.

Введение. В последнее время кремниевые подложки привлекают большое внимание исследователей и производителей фоточувствительных слоев КРТ. Характеристики и качество получаемых слоев в большой мере зависят от уровня дефектности буфера CdTe. Гетеросистема CdTe/Si является сильно рассогласованной как по параметрам кристаллической решетки подложки и пленки (при комнатной температуре: $a_{Si} = 0,357$ нм, $a_{CdTe} = 0,386$ нм), так и по полярности и валентности материалов пленки и подложки. Поэтому основная часть дефектов при эпитаксии CdTe/Si закладывается на гетерогранице. В настоящее время основными методами снижения плотности дефектов на гетерогранице CdTe/Si являются предэпитаксиальная модификация структуры поверхности подложки элементами V и VI групп, а также разновидности слоевых эпитаксий. Например, авторы [1] показали, что предварительная обработка поверхности кремния мышьяком и использование атомно-слоевой эпитаксии на начальных стадиях роста буферного слоя позволяют существенно повысить структурное совершенство слоя CdTe. Однако четких представлений о том, что конкретно происходит на поверхности кремния при таких обработках, пока нет. Особенно привлекают внимание исследователей высокореактивные поверхности, и если теорети-

ческие работы, посвященные таким поверхностям, уже появляются (например, [2]), на практике известно о них не много.

Целью данной работы является изучение взаимодействия молекулярных пучков теллура и мышьяка с чистой поверхностью кремния (113).

Методы исследования. Основные эксперименты проводились на трехкамерной сверхвысоковакуумной установке, состоящей из камеры загрузки-выгрузки, камеры роста и камеры анализа. Базовый уровень вакуума составлял $1 \cdot 10^{-9}$ торр. Камера роста была оборудована молекулярными источниками и системой дифракции быстрых электронов ($U = 25$ кВ), камера анализа – оже-спектрометром. Методом ДБЭ изучалась структура поверхности, методом оже-спектроскопии – ее состав. Давление молекулярных потоков теллура и мышьяка измерялось ионизационным вакуумметром ВИ-14 и варьировалось в пределах $1 \cdot 10^{-7} - 5 \cdot 10^{-6}$ торр. Термический нагрев образцов контролировался с помощью термпары. Оже-исследование образцов проводилось на спектрометре ОИУОС-3, анализатор которого типа двойного цилиндрического зеркала позволял регистрировать оже-электроны с чувствительностью по энергиям $\Delta E/E = 1\%$. Зондирующий пучок формировался электронной пушкой ($I_{\text{н}} = 3$ А, $I_{\text{п}} = 10$ мкА) и ускорялся напряжением 3 кВ. Использовалось модулирующее напряжение 2 В. Анализировались LVV-пик кремния (92 эВ), MNN-пик теллура (482 эВ), MNN-пик мышьяка (31 эВ). Примеси на поверхности оценивались по KLL-пикам углерода (272 эВ), азота (379 эВ) и фтора (67 эВ). Для количественных оценок присутствия элементов на поверхности использовался стандартный метод измерения амплитуд пиков. Полученные значения затем умножались на коэффициенты чувствительности для каждого элемента, рассчитанные с помощью эталонных пиков [3]. Для большей достоверности данных, полученных путем анализа оже-спектров от разных образцов, была определена аппаратная погрешность данного спектрометра. Для образцов кремния, прошедших стандартную обработку, включающую в себя химическое травление и нагрев в вакууме, регистрировалась абсолютная интенсивность пика кремния 92 эВ. Для нескольких десятков образцов колебания измеренной величины лежали в 10 %-ном интервале.

Ex situ проводилось исследование образцов Te/Si с помощью спектрального эллипсометра. Эллипсометрическая установка была собрана по балансовой схеме, источником излучения служила ксеноновая лампа, сканирование по спектру осуществлялось монохроматором МСД-1 в диапазоне $\lambda = 230 - 650$ нм с разрешением 6 нм.

Результаты исследований. Образцы кремния выкалывались из двухдюймовых окисленных шайб ориентаций (113) и проходили стандартную химическую обработку для удаления окисного слоя и пассивации поверхности. Исходный толстый окисел удалялся с поверхности подложки в концентрированной HF. Затем подложка помещалась в горячий раствор $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ в соотношении 1 : 4 : 20. При этом образовывался тонкий слой окисла, который затем удалялся в 0,5 %-ном водном растворе HF. После каждой операции проводилась промывка в деионизованной воде. В результате такой обработки поверхность становилась пассивированной (гидрогенизированной) [4]. Образцы крепились на носителе прижимными лапками в лабораторном вытяжном шкафу. Выдержка на воздухе не превышала 10 мин.

После предварительного прогрева в течение 3 ч при температуре 150 °С образцы отжигались при 600 °С в течение 10 мин для удаления пассивирующего слоя водорода.

На рис. 1, *a, b* представлены дифракционные картины поверхности кремния (113) после химического травления и прогрева в вакууме при температуре 150 °С. В дальнейшем в азимуте [011] основные рефлекссы при нагреве до 450 °С вытягиваются в тяжи, при 500 °С – между ними проступают сверхструктурные рефлекссы, которые полностью формируются и сравниваются по интенсивности с основными при достижении температуры 600 °С (рис. 1, *d*). В азимуте [233] нам не удалось четко идентифицировать наблюдаемую после прогрева при $T = 600$ °С сверхструктуру. На рис. 1, *c* видно, что, наряду с основными рефлекссами, слабо проявляются дробные. Мы предполагаем, что в нашем случае в результате предэпитаксиального отжига на поверхности кремния (113) формируется одна из следующих сверхструктур: (4×2) , (2×2) или (1×2) . В дальнейшем азимут [233] нами детально не исследовался, а основное внимание обращалось на азимут [011], где сверхструктурные переходы явно различимы. Поэтому при обсуждении сверхструктурных переходов мы будем говорить о сверхструктуре $(n \times 2)$.

Оже-анализ поверхности показал, что с появлением сверхструктурных рефлекссов на дифракционных картинах количество углерода и кислорода на поверхности резко снижается до уровня чувствительности прибора. Приготовленная таким образом поверхность использовалась для дальнейших экспериментов по адсорбции теллура и мышьяка.

Взаимодействие молекулярного потока теллура с поверхностью кремния изучалось в широком интервале температур подложки (20 – 600 °С). Было

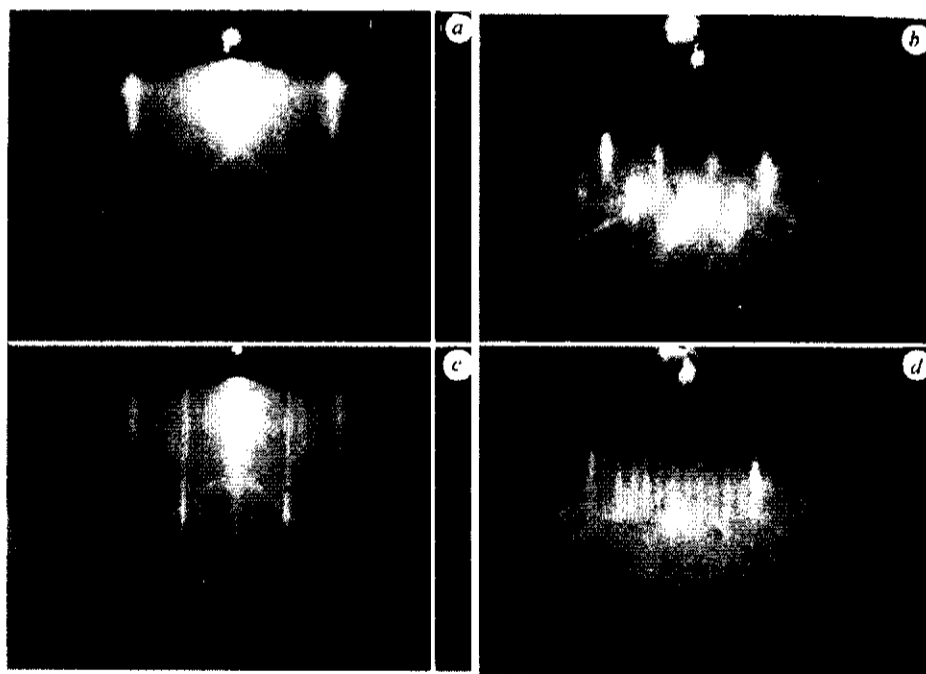


Рис. 1. Дифракционные картины поверхности кремния (113) до и после термического отжига в вакууме при $T = 600$ °С в течение 10 мин:
a, b – до отжига; *c, d* – после отжига; *a, c* – азимут [233]; *b, d* – азимут [011]

установлено, что процесс адсорбции теллура на поверхности кремния можно разделить на три этапа: при температурах образца менее 200 °С происходит рост поликристаллической пленки теллура, этот процесс ничем не лимитируется и можно вырастить пленку поликристаллического теллура любой толщины. В интервале температур образца 200 – 450 °С независимо от плотности потока и времени экспозиции количество теллура на поверхности кремния не превышает 20 % от числа атомов в исследуемом объеме. При этом сверхструктура ($n \times 2$) на дифракционной картине сохраняется. Если образец имеет температуру больше 450 °С, теллур на поверхности не обнаруживается и никаких сверхструктурных перестроек не наблюдается.

Так же подробно был исследован процесс десорбции Те с поверхности кремния. Для этого образец Si(113) осаждался до комнатной температуры и выдерживался в молекулярном потоке теллура. Обработка Те проводилась до исчезновения дифракционных рефлексов и появления поликристаллических дуг. Затем образец нагревался до заданной температуры (не выше 600 °С), при этом регистрировалась дифракционная картина и записывались оже-спектры от поверхности образца. Подобно адсорбции процесс десорбции теллура с поверхности кремния можно разделить на три этапа: при температурах образца менее 200 °С процесс десорбции теллура не происходит, в течение длительного времени не происходит заметного изменения на дифракционных картинах и оже-спектрах. В интервале температур образца 200 – 450 °С независимо от времени экспозиции теллур на поверхности кремния остается в количестве, не превышающем 20 % от числа атомов в исследуемом объеме. Если образец имеет температуру выше 450 °С, теллур на поверхности не обнаруживается. При этом при температурах образца выше 200 °С дифракционная картина со сверхструктурой ($n \times 2$) полностью восстанавливается. Дальнейшее повторение циклов осаждение – нагрев (до 400 °С) не приводило к увеличению количества теллура на поверхности образца.

Отдельно хотелось бы отметить, что попавший или оставшийся на поверхности кремния, нагретой до 200 – 450 °С, теллур понижает абсолютную интенсивность пика кремния максимум в 1,5 раза.

Обработка мышьяком образцов Si(113) проводилась в тех же температурных режимах, что и теллуrom, включая циклы напыление – термическая очистка и экспозиции в потоке мышьяка при различных температурах поверхности подложки (30 – 600 °С). Данные ДБЭ и оже-анализа для мышьяка отличаются от теллура. При обработке мышьяком сверхструктурные рефлексы исчезают и не восстанавливаются ни при каких условиях, т. е. для поверхности кремния (113) с адсорбированным мышьяком наблюдалась сверхструктура (1×1), подобная представленной на рис. 1, а, б. На оже-спектре такой поверхности регистрировался пик мышьяка. Даже прогревом при $T = 600$ °С не удается полностью очистить поверхность от присутствующего на ней мышьяка. Слой мышьяка, остающийся на поверхности кремния, после отжига при 300 – 600 °С имеет следующие количественные характеристики. Относительное количество мышьяка составляет ~ 70 %, абсолютная интенсивность пика кремния резко уменьшается (в 7 раз).

Мы также исследовали адсорбцию теллура на поверхности кремния, стабилизированной мышьяком. На поверхность такого образца при комнатной температуре осаждался поликристаллический теллур, затем образец был отожжен при 300 °С до восстановления исходной дифракционной

картины. Оже-анализ показал появление пика теллура (~15%), как и в случае адсорбции на не стабилизированную мышьяком поверхность кремния. При этом абсолютные интенсивности пиков кремния и мышьяка уменьшились незначительно (в 1,2 раза).

Дополнительно нами были изучены процессы сублимации и осаждения теллура и мышьяка на поверхности кремния (001) и (013). По данным оже-спектроскопии для этих ориентаций существуют те же температурные интервалы и те же количественные характеристики слоев теллура и мышьяка, полученных в этих интервалах, что и для ориентации (113).

Образец кремния с адсорбированным на поверхности Te (около 20%) исследовался методом спектральной эллипсометрии. Измерения проводились *ex situ* на воздухе в течение 1 ч после извлечения образца из вакуумной камеры. По результатам этих измерений рассчитывались псевдодиэлектрические функции исследуемой поверхности $\epsilon_1(E)$ и $\epsilon_2(E)$ по модели полубесконечной среды (здесь E – энергия фотона), которые представлены на рис. 2. Для сравнения были измерены также спектры эллипсометрических параметров свежеработанной и пассивированной водородом поверхности Si. На основании этих измерений и с учетом толщины пассивирующей пленки (6 Å) были рассчитаны диэлектрические функции «чистой» поверхности кремния $\epsilon_1(E)$ и $\epsilon_2(E)$, которые также представлены на рис. 2. Наблюдаемые различия в спектрах обусловлены, очевидно, эффектом поверхностной пленки.

Обсуждение результатов. Важным моментом явилось для нас установление вида образующихся на поверхности кремния слоев теллура и мышьяка и их сравнение между собой. Мы регистрировали присутствие на поверхности кремния теллура и мышьяка при прогревах до 450 °С. Давление паров этих элементов при таких температурах очень велико (у Te $\approx 1 \cdot 10^{-1}$ торр, у As – 10 торр), т. е. элементарные теллур и мышьяк присутствовать на поверхности при данных условиях не могут. По-видимому, можно предположить, что при температурах 200 – 450 °С на поверхности остаются только теллур и мышьяк, каким-то образом связанные с кремнием. Отсюда логично заключить, что это монослойные или субмонослойные покрытия. Из детального рассмотрения данных, полученных после обработки поверхности кремния теллуrom и мышьяком, видно, что они приводят к различным состояниям

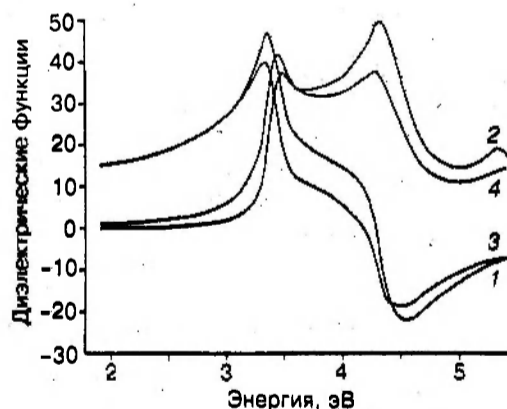


Рис. 2. Диэлектрические функции кремния ϵ_1 и ϵ_2 (кривые 1, 2) и псевдодиэлектрические функции ϵ_1 , ϵ_2 (кривые 3, 4) образца Si после обработки в потоке Te и отжига в вакууме

поверхности. В случае экспозиции в потоке мышьяка наблюдается резкое (почти на порядок) уменьшение абсолютной амплитуды пика кремния, относительное же количество мышьяка достигает 70 %. При этом наблюдается сверхструктурный переход ($n \times 2$) в (1×1). При экспозиции в потоке теллура получаемый результат существенно отличается от полученного в случае адсорбции мышьяка. Абсолютная интенсивность пика кремния снижается незначительно (в 1,5 раза), а теллур детектируется в количестве около 20 %. Исходная сверхструктура при этом сохраняется. Из [5] известно, что глубина выхода электронов существенно зависит от их кинетической энергии с ярко выраженным минимумом в районе 100 эВ. Поэтому интенсивность пика кремния (92 эВ) очень чувствительна ко всем тем адсорбатам, которые находятся поверх кремния. Исходя из вышеизложенного и того, что слой мышьяка снижает интенсивность пика кремния в 7 раз, а слой теллура – только в 1,5 раза, можно предположить, что слой мышьяка сплошной, а слой теллура состоит из отдельных островков. Это подтверждают и изменения дифракционных картин при адсорбции того или иного компонента. Островки теллура покрывают меньшую часть поверхности образца и не вносят существенных изменений в дифракционную картину. Поэтому мы не наблюдаем изменения сверхструктуры. Из анализа данных, полученных при осаждении Te на поверхность As/Si, можно сделать вывод, что и в этом случае пленка теллура носит островковый характер. Полное удаление теллура с поверхности кремния при прогревах свыше 450 °C свидетельствует о слабой связи Te–Si; это подтверждается в [6], где указывается, что единственно возможное соединение кремния с теллуром – сесквителлурид кремния Si_2Te_3 – является нестойким и существует в узком интервале температур. Логично предположить, что связь As–Si значительно прочнее, поскольку прогревы до 600 °C не разрушают ее и мышьяк не испаряется с поверхности кремния.

Анализ полученных эллипсометрических спектров был проведен путем численного моделирования. По модели «подложка Si – однослойная или двухслойная пленка» находились расчетные спектры псевдодиелектрических функций $\epsilon_{1,2p}$, которые сравнивались затем с измеренными спектрами. Количественной характеристикой сравнения служила целевая функция

$$S = (1/N) \sum [(\epsilon_1(E_i) - \epsilon_{1p}(E_i))^2 + (\epsilon_2(E_i) - \epsilon_{2p}(E_i))^2],$$

где суммирование проводилось по всем энергиям фотонов: $i = 1, 2, \dots, N$. В качестве предполагаемых слоев на Si анализировались: аморфный Te, SiO_2 , а также смеси Te с SiO_2 и вакуумом, диэлектрические функции которых рассчитывались по модели эффективной среды [7]. Физически такие смеси соответствуют включениям или островкам Te.

Цель моделирования заключалась в минимизации целевой функции подбором одного или нескольких параметров слоев. Результаты приведены в таблице. Для сравнения в таблице дано также значение целевой функции для «чистой» поверхности Si ($S = 41,6$). Абсолютный минимум целевой функции достигается для слоя SiO_2 толщиной 20 Å. Известно, однако, что в течение 1 ч экспозиции Si на воздухе толщина выросшей окисной пленки не превышает 10 Å [8]. С учетом этого была рассмотрена модель Si – (10 Å SiO_2) – (Te + поры), минимум целевой функции $S = 2,1$ для которой достигался при плотности Te, равной 0,5 %, и толщине эффективного слоя 550 Å.

Другие модели, учитывающие наличие Те на поверхности, дают значения целевой функции, по крайней мере в 1,5 раза больше полученного для SiO_2 .

Если исходить из факта, что за время измерения на воздухе толщина образующегося окисла SiO_2 не должна превышать 8–10 Å, то наиболее вероятным поверхностным слоем является гипотетический слой, оптические свойства которого сходны с оптическими свойствами SiO_2 (т. е. имеющий слабую дисперсию ϵ_1 при $\epsilon_2 = 0$, что характерно для диэлектриков). Таким слоем может быть сесквителлурид кремния, обладающий диэлектрическими свойствами.

В работе [9] изучалась адсорбция Те на поверхности кремния *in situ* и показано, что адсорбция теллура на кремнии начинается с появления сильно разрозненных островков. Граница раздела Те/Si имеет высокий оптический контраст (при $\lambda = 0,63$ мкм), что делает метод эллипсометрии крайне чувствительным к наличию элементарного Те на поверхности Si. Из приведенной в [9] номограммы следует, что при сплошном покрытии теллуrom изменяется в основном параметр Ψ и чувствительность составляет $\delta\Psi/\delta d = 0,15$ град/Å, при частичном покрытии (20%), наоборот, изменяется параметр Δ и $\delta\Delta/\delta d = 0,5$ град/Å. Это означает, что при 20%-ном покрытии островками в один монослой параметр Δ должен уменьшиться на $1,5^\circ$. Между тем в экспериментах *in situ* после термического удаления Те такие изменения не обнаруживаются. Если предположить, что поверхностный Те находится не в элементарном состоянии, а в виде соединения с оптическими свойствами, аналогичными SiO_2 , то при плотности покрытия 20% соответствующий коэффициент чувствительности по Δ уменьшается в 3 раза и составляет 0,15 град/Å, а при 10%-ном покрытии – всего лишь 0,07 град/Å. Эти оценки позволяют понять, почему после термического удаления Те эллипсометрические измерения *in situ* не обнаруживают поверхностного слоя, в то время как данные оже-спектроскопии свидетельствуют о наличии Те на поверхности.

Система кремний–теллур исследовалась в ряде работ [10, 11], где были определены термодинамические свойства сесквителлурида кремния. Данные этих работ позволяют определить область условий, в которых возможно существование соединения кремния с теллуrom. Согласно работам [10, 11], теллур в паровой фазе над соединением кремния и теллура присутствует в основном в виде паров как элементарного теллура, так и теллурида кремния SiTe . Был проведен расчет упругости паров двухатомного теллура и теллурида кремния над Si_2Te_3 и упругости паров чистого теллура (кривая /

Модель	Содержание Те в слое, %	Толщина слоя, Å	S, усл. ед.
Si	..	–	41,6
Si – SiO_2	..	20	0,86
Si – (10 Å SiO_2) – (Те + поры)	0,5	550	2,1
Si–Te	..	12	1,35
Si – (Те + поры)	90	12	1,21
Si – (Те + SiO_2)	90	12	1,27

на рис. 3). При расчете использовалась экстраполяция выражений для температурной зависимости упругости паров (см. рис. 3):

$$\lg P_{\text{Te}_2}(\text{атм}) = -10,152(10^3)/T - 7,5634(604 - 892 \text{ }^\circ\text{C}) \text{ (кривая 2),}$$

$$\lg P_{\text{SiTe}_2}(\text{атм}) = -12,31(10^3)/T + 7,874(700 - 892 \text{ }^\circ\text{C}) \text{ (кривая 3 [11]),}$$

$$\lg P_{\text{Te}_2}(\text{атм}) = -11,1(10^3)/T + 7,9(775 - 950 \text{ }^\circ\text{C}) \text{ (пунктирная кривая [10]).}$$

Результаты расчета представлены на рис. 3.

Давление паров элементарного теллура (кривая 2) существенно выше (на 2–4 порядка величины в зависимости от температуры), чем давление паров теллурида кремния. Следовательно, сесквителлурид кремния при испарении разлагается с образованием паров теллура, твердого кремния и небольшого количества $\text{SiTe}_{\text{пар}}$. Учитывая, что давление, эквивалентное плотности молекулярного потока теллура, варьировалось в пределах $1 \cdot 10^{-7} - 5 \cdot 10^{-6}$ торр (область между двумя штриховыми горизонтальными линиями на рис. 3), из результатов расчетов можно заключить, что осаждение элементарного теллура (кривая 1) на подложке возможно при температурах не выше $220 \text{ }^\circ\text{C}$. Это согласуется с полученными экспериментальными результатами, из которых следует, что в потоке теллура происходит образование слоя теллура на подложках кремния до температур менее $200 \text{ }^\circ\text{C}$. Существование фазы сесквителлурида кремния возможно до температуры $370 \text{ }^\circ\text{C}$, и это единственная фаза, которая может образовываться в потоке теллура на подложке кремния в интервале температур $200 - 370 \text{ }^\circ\text{C}$. Однако экспериментально образования фазы Si_2Te_3 в этом интервале температур не наблюдалось. Очевидно, что температура $200 - 370 \text{ }^\circ\text{C}$ оказывается слишком низкой, чтобы происходило перемещение атомов кремния из поверхностных слоев подложки, что необходимо для образования покрытий с толщиной большей, чем монослойная. Более того, сплошного слоя теллура или его соединения с кремнием на поверхности также не образовывалось, хотя энергия связи кремний–теллур в объеме сесквителлурида кремния достаточна для этого. Как показано в работе [12], на адсорбцию на поверхности полупроводников большое влияние оказывают образующиеся поверхностные состояния.

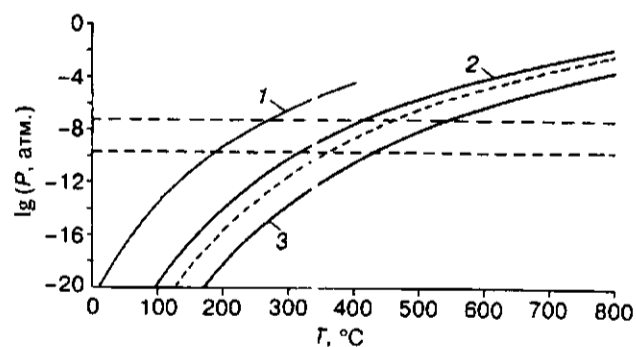


Рис. 3. Рассчитанные давления паров теллура над чистым теллуrom (кривая 1), теллура над сесквителлуридом кремния (кривая 2 по данным работы [11] и пунктирная кривая по данным работы [10]) и давление паров теллурида кремния (кривая 3 [11])

Поэтому степень заполнения поверхности адсорбируемым компонентом может оказаться существенно меньше единицы, если введение поверхностных состояний уменьшает суммарную энергию взаимодействия адсорбируемого вещества с поверхностью.

Заключение. Проведены исследования адсорбции теллура и мышьяка на поверхности кремния (113). Показано, что возможно присутствие сплошных монослойных покрытий мышьяка на поверхности кремния до температуры подложки 600 °С. Установлено, что невозможно существование сплошных монослойных покрытий Те на поверхности кремния. Адсорбированный Те может присутствовать на поверхности кремния только в виде отдельных островков и только до температуры подложки 450 °С. Также показано, что и на поверхности кремния, стабилизированной мышьяком, адсорбционный слой Те не является сплошным и состоит из отдельных островков.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 97-02-18491).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Million A., Dhar N. K., Dinan J. H. Heteroepitaxy of CdTe on {211}Si substrates by molecular beam epitaxy // *J. Cryst. Growth*. 1996. 159. P. 76.
2. Feng K. A., Hu X. M., Lin Z., Xing Y. R. The structures and transformations on Si(113) surface // *Appl. Surf. Sci.* 1997. 120. P. 94.
3. Palmberg P. W., Riach G. E., Weber R. E., McDonald N. C. Handbook of Auger Electron Spectroscopy: Perkin-Elmer, Eden Prairie, MN, 1972.
4. Higashi G. S., Chabal Y. J., Trucks G. W., Raghavachari K. Ideal hydrogen termination of the Si(111) surface // *Appl. Phys. Lett.* 1990. 56, N 7. P. 657.
5. Анализ поверхности методами оже- и рентгеновской электронной спектроскопии /Под ред. М. П. Сиха, Д. Бриггса. М.: Мир, 1987.
6. Ploog K., Stetter W., Nowitzki A., Schonherr E. Crystal growth and structure determination of silicon telluride Si₂Te₃ // *Math. Res. Bull.* 1976. 11. P. 1147.
7. Aspnes D. E. Optical properties of thin films // *Thin Solid Films*. 1982. 89. P. 249.
8. Lukes F. Oxidation of Si and GaAs in air at room temperature // *Surf. Sci.* 1972. 30. P. 91.
9. Shvets V. A., Chikichev S. I., Pridachin D. N. et al. Ellipsometric study of tellurium molecular beam interaction with dehydrogenated vicinal silicon surfaces // *Thin Solid Films*. 1998. 313–314, N 1–2. P. 562.
10. Exsteen G., Drowart J., Vander A.-M., Callaerts R. Thermodynamic study of silicon sesquitelluride using a mass spectrometer // *J. Phys. Chem.* 1967. 71. P. 4130.
11. Brebrick R. F. Si-Te system: partial pressures of Te₂ and SiTe and thermodynamic properties from optical density of vapor phase // *J. Chem. Phys.* 1968. 49. P. 2584.
12. Krishnamurthy S., Berding M. A., Sher A., Chen A.-B. Energetics of molecular-beam epitaxy models // *J. Appl. Phys.* 1990. 68, N 8. P. 4020.

Поступила в редакцию 24 мая 1998 г.