

**SURFACE PHASES
AND MICROELECTRONIC
STRUCTURES GROWTH
ON SILICON**

V. G. LIFSHITS

The conditions of surface phases formation on silicon in ultra-high vacuum are described. The construction of the different surface phase diagrams is discussed. The paper contains a review of the data on the two- and three-component surface phases formation on silicon surface at coadsorption processes. The case of delta-doping in which the delta-doped layers are surface phases is presented.

Описаны условия формирования поверхностных фаз на кремнии в сверхвысоком вакууме. Обсуждается построение диаграмм различных поверхностных фаз. Статья содержит обзор данных об образовании двух- и трехкомпонентных поверхностных фаз на кремнии при процессах соадсорбции. Рассмотрены результаты изучения дельта-легирования, в котором дельта-легированные слои суть поверхностные фазы.

© Лифшиц В.Г., 1997

**ПОВЕРХНОСТНЫЕ ФАЗЫ
И ВЫРАЩИВАНИЕ
МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ
СТРУКТУР НА КРЕМНИИ**

В. Г. ЛИФШИЦ

*Дальневосточный государственный университет,
Владивосток*

ВВЕДЕНИЕ

В нашей статье о поверхности твердого тела [1] мы уже говорили о том, что следует считать поверхностью, а что — поверхностной фазой. Под поверхностной фазой понимают тонкий двумерный слой на поверхности монокристалла, находящийся в термодинамическом равновесии с объемной фазой. Поверхностная фаза может быть сформирована теми же атомами, что и объемная фаза (например, поверхность Si(111)7 × 7 на атомно-чистой поверхности кремния) [2]. Если напылить на монокристаллическую подложку примерно монослой чужеродного вещества (монослой — это слой толщиной в один атом, и такое покрытие будем называть субмонослойным), то в термодинамически равновесных условиях на поверхности сформируется поверхностная фаза — новое вещество из атомов подложки и чужеродных атомов со своей собственной электронной структурой, кристаллической решеткой и свойствами. При этом следует различать атомы, входящие в состав поверхностной фазы (будем называть их атомами “в фазе”), и атомы, находящиеся в избытке по отношению к концентрации чужеродных атомов, когда вся поверхность покрыта поверхностной фазой (будем такие атомы называть атомами “на фазе”).

Заметим, что атомы “в фазе” относительно сильно связаны с подложкой, определяют поверхностную реконструкцию подложки, изменяют ее валентную полосу. Атомы “на фазе” относительно слабо связаны с подложкой, не участвуют в реконструкции поверхности и не изменяют валентную полосу подложки. Это различие между атомами, входящими в состав поверхностной фазы и избыточными по отношению к ней, определяет природу всех поверхностных процессов и обычно принимается во внимание при объяснении формирования поверхностных фаз и поверхностных процессов. Среди других свойств геометрическая структура считается одной из важнейших характеристик поверхностных фаз, довольно успешно позволяющая их идентифицировать. Обычно поверхностные фазы обозначаются в соответствии с их периодичностью относительно монокристаллической подложки, на которой они

выращены. Так, например, поверхностная фаза $\text{Si}(111)3 \times 1\text{-Ag}$ (сокращенно $3 \times 1\text{-Ag}$) имеет период решетки в три раза больше, чем период кремниевой подложки с ориентацией (111).

ПОЛУЧЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ФАЗ

Теперь мы знаем, что для образования поверхностной фазы необходимы определенная концентрация чужеродных атомов (этих атомов должно хватить на образование атомов “в фазе”) и, конечно, термодинамическое равновесие. Если первое требование понятно, то второе нуждается в некотором пояснении. Действительно, напылим примерно треть монослоя Al на поверхность чистого кремния с ориентацией (111). Мы уже писали [1], что на чистой поверхности кремния в сверхвысоком вакууме образуется кремниевая поверхностная фаза $\text{Si}(111)\text{-}7 \times 7$. После напыления алюминия, допустим при комнатных температурах, мгновенного образования поверхностной фазы Si–Al не произойдет, хотя образовать поверхностную фазу Si–Al выгоднее для такой системы, чем оставить структуру $\text{Si}(111)\text{-}7 \times 7$. Это связано с тем, что перед образованием новой поверхностной фазы Si–Al необходимо разрушить старую ($\text{Si}(111)\text{-}7 \times 7$), которая обладает некоторой термодинамической устойчивостью. Конечно, через достаточно большой промежуток времени система должна прийти в состояние термодинамического равновесия даже при относительно низкой температуре и все равно образовать поверхностную фазу Si–Al. В действительности для быстрого образования равновесной ситуации, то есть образования поверхностной фазы, образец надо нагреть. Рассмотрим некоторые примеры образования поверхностных фаз, используемые в мировой практике.

Напыление на горячую подложку

Это один из наиболее часто используемых способов. Вот как получали поверхностную фазу сурьмы Sb на $\text{Si}(111)$. Нагревали подложку до температур $550\text{--}650^\circ\text{C}$ и напыляли Sb со скоростью 1–5 монослоя в минуту. При таких температурах на поверхности формируется фаза $\text{Si}(111)\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-Sb}$ с покрытием Sb в один монослой. “ $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ ” – период этой новой фазы кремний–сурьма. Атомы Sb в этом монослое – атомы “в фазе”, то есть достаточно сильно связаны с подложкой. Все следующие атомы будут уже “на фазе”, то есть значительно слабее связаны с подложкой, и при таких температурах (а их специально выбрали такими) легко десорбируются с поверхности. Атомы “в фазе” при этом остаются на подложке, то есть поверхностная фаза кремний–сурьма не разрушается. Такой метод удобен, так как нет нужды точно контролировать время напыления и температуру образца.

Напыление на холодную подложку и отжиг

Этот метод применяется тогда, когда хотят создать на поверхности не только поверхностную фазу, но и какое-то избыточное количество чужеродных атомов, например в виде атомов “на фазе” или островков. В статье [1] мы приводили пример поверхностной диффузии из полоски золота по кремнию. Нужно было иметь достаточно много легкоподвижных атомов, которые могли бы диффундировать по поверхностной фазе кремний–золото. Поэтому и напылялось золота больше, чем требуется для поверхностной фазы. Напомним, что те атомы золота, которые вошли в состав поверхностной фазы, оставались неподвижными, а все избыточные как раз и диффундировали по поверхности.

Формирование поверхностных фаз диффузионной разгонкой

Это довольно экзотический способ получения поверхностных фаз. Он применяется, как правило, когда хотят получить на одной поверхности несколько поверхностных фаз с различной концентрацией чужеродных атомов и провести их сравнительный анализ в единых условиях. Обычно при таком способе на поверхность подложки наносят полоску чужеродных атомов толщиной в несколько атомных слоев и производят отжиг. В результате атомы чужеродного вещества диффундируют по поверхности в область чистой подложки, и там, где их концентрация достигает некоторых величин, необходимых для формирования той или иной поверхностной фазы, такие фазы образуются: ближе к полоске – с большими концентрациями чужеродных атомов, дальше – с меньшими.

Отжиг высоколегированных образцов

Пути доставки чужеродных атомов на поверхность для формирования поверхностных фаз могут быть самые различные. Главное при этом, чтобы необходимая концентрация этих атомов оказалась на поверхности и температурные условия были подходящими. Расскажем, как мы впервые получили поверхностную фазу $\text{Si}(111)\text{-}\sqrt{3}\text{-B}$. Так просто бор не напылить – это очень тугоплавкий материал. Тогда мы взяли образец кремния, легированный бором (высоколегированный бором кремний, сейчас станет понятно почему), и стали его отжигать при высоких температурах (1400°C). Выше температуру поднимать уже было нельзя – кремний расплавился бы. Что же получилось? Поскольку энергия связи атомов бор–кремний существенно выше энергии связи атомов кремний–кремний, при таких температурах в первую очередь стали испаряться с поверхности атомы кремния слой за слоем. Присутствующий же в этих слоях бор оставался, и, таким образом, происходило его накопление на поверхности. Когда концентрация бора достигла некоторой

критической величины, на поверхности сформировалась поверхностная фаза Si–В.

ПОСТРОЕНИЕ ФАЗОВЫХ ДИАГРАММ

В этом разделе мы рассмотрим, как строятся фазовые диаграммы для поверхностных фаз, и приведем некоторые примеры. Обычно такие диаграммы строятся в координатах покрытие – температура. Здесь мы употребили новое понятие – “покрытие” (далее ϑ). Величина ϑ – это отношение числа чужеродных атомов на поверхности к числу атомов в верхнем монослое подложки. Например, в кремнии, в самом поверхностном слое (111), содержится $7,8 \cdot 10^{14}$ атомов/см². Если говорят, что ϑ составляет 1, то это значит, что на поверхность кремния нанесли один монослой чужеродных атомов, а их число – $7,8 \cdot 10^{14}$ на 1 см².

Первый способ построения фазовых диаграмм заключается в том, что адсорбат наносят на поверхность подложки при фиксированной температуре и после каждой порции напыленного вещества определяют поверхностную структуру, например методом дифракции медленных электронов, о котором мы писали в [1]. Проведя такую процедуру при разных температурах, получают фазовую диаграмму.

Второй способ заключается в нанесении адсорбата при комнатной температуре и последующем отжиге при возрастающих температурах. Этот способ требует особой аккуратности, так как при отжиге часть атомов может собраться в островки или вообще десорбироваться с поверхности. Таким образом, следует помнить, что количество напыленных на поверхность и оставшихся в результате отжига атомов может существенно различаться и реальная диаграмма будет уже отражать число чужеродных атомов, оставшихся на поверхности. Конечно, отжиг следует проводить достаточно долго, чтобы реализовалась равновесная ситуация и соответствующая поверхностная фаза успела образоваться при определенной температуре.

На рис. 1 приведены схематические фазовые диаграммы Ag/Si(111) и Au/Si(111). Они просты и не нуждаются в пояснениях, разве что следует добавить, что приведенные покрытия наблюдались после отжига.

СОАДСОРБЦИЯ ДВУХ ТИПОВ АТОМОВ И ТРЕХКОМПОНЕНТНЫЕ ПОВЕРХНОСТНЫЕ ФАЗЫ

Наука о поверхностных фазах проходит те же этапы, что и наука об объемных фазах. Как развивалась наука об объемных фазах? Сначала получение сведений о чистых веществах, состоящих из одного элемента, анализ их кристаллической и электронных структур, затем изучение свойств и использование этих материалов. Очень быстро поняли, что добавление второго компонента может привести к дополнительным возможностям, и стали получать

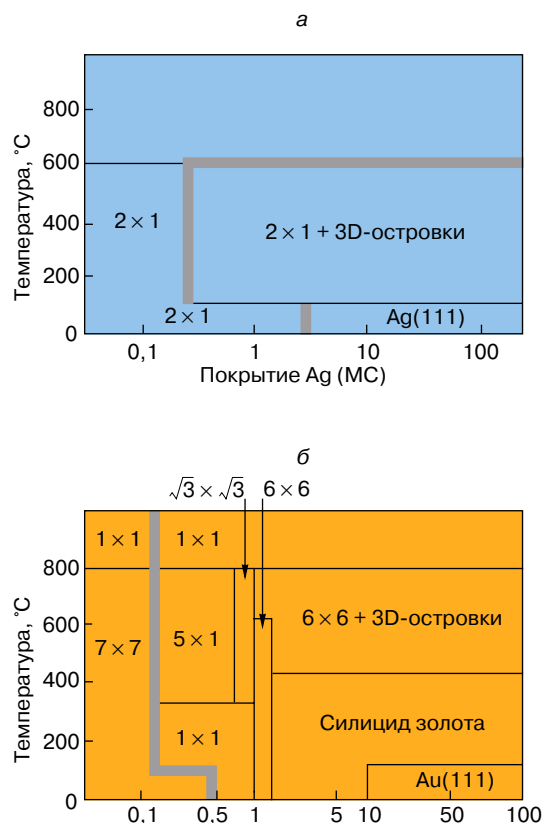


Рис. 1. Схематические фазовые диаграммы Ag (а) и Au (б) на кремнии для случая напыления металла на нагретую подложку Si(111)

объемные соединения и сплавы, исследовать их структуры и свойства, строить фазовые диаграммы с тем, чтобы каждый мог получить тот сплав, который ему нужен. Сейчас уже трудно определить, кто же первый добавил третий компонент в объемный сплав, но это была маленькая революция в материаловедении. Например, в полупроводниковом материаловедении известно очень много примеров добавления третьего компонента в двухкомпонентный полупроводник с целью изменения параметров решетки, ширины запрещенной зоны и т.д.

Наука о поверхности проходит те же этапы развития. Например, при исследовании поверхности кремния сначала произвели анализ чистой поверхности, то есть поверхностных фаз самого кремния на кремниевом монокристалле. Сразу после этого в начале 60-х годов стали напылять второй компонент и исследовать двухкомпонентные поверхностные фазы. Развитие методов исследования [3–5] позволило изучать кристаллические и электронные структуры поверхностных фаз, и сейчас уже можно сказать, что исследователи довольно преуспели в этом, как и в построении двухкомпонентных двумерных фазовых диаграмм кремний–адсорбат.

Например, в нашей книге [2] можно найти эти сведения практически о любом адсорбате на кремнии.

Что же предстоит сделать в области исследования поверхности далее, если предположить, что наука о поверхности будет развиваться примерно так же, как и наука об объемных материалах? Во-первых, про свойства поверхностных фаз известно явно недостаточно, хотя в конце 80-х годов такие исследования и начали проводиться. Это безусловно ограничивает возможности применения поверхностных фаз, хотя и выглядят они очень привлекательными для повышения интеграции полупроводниковых приборов. Поэтому сейчас такие исследования усиленно продолжаются. Во-вторых, исследователи стали изучать формирование поверхностных фаз уже из трех компонентов: кремния и двух адсорбатов (начало 90-х годов). Процесс, когда на подложку наносят не один, а два адсорбата, называется соадсорбцией. Рассмотрим, что может получиться, если на поверхность монокристалла напылять два адсорбата. Здесь мы будем рассматривать процесс соадсорбции на кремниевую монокристаллическую подложку. Но все сказанное ниже можно, конечно, отнести и к другим материалам.

На рис. 2 приведены разнообразные ситуации, возникающие при соадсорбции. Заметим, что в равновесных условиях безразлично, какой элемент напыляется вначале, а какой – после. Конечный результат будет одинаковым, и определяется он стремлением системы к минимуму энергии. Рассмотрим различные ситуации, реализующиеся при соадсорбции.

Формирование двухкомпонентных поверхностных фаз

Пусть на поверхность кремния наносятся адсорбаты типа А и В. Допустим, энергия связи в поверхностной фазе Si–А больше, чем в Si–В. (Кстати, несколько слов об энергии связи. Удалите кремниевую подложку от атомов сорта А на бесконечное расстояние. Подсчитайте их энергии отдельно и сложите их. Затем посадите атомы А на подложку, образовав поверхностную фазу, и определите энергию системы. Она окажется меньше, иначе фаза не образовалась бы. Эта разность в энергиях, этот энергетический выигрыш и есть энергия связи.) Значит, на поверхности кремния образуется поверхностная фаза Si–А. Что же с атомами В? Это теперь уже атомы “на фазе”, слабо связанные, поведение которых мы уже обсуждали ранее. Если система выиграет больше при формировании поверхностной фазы Si–В, атомы сорта А окажутся в роли атомов “на фазе”.

Приведем пример. Сформируем сначала на поверхности поверхностную фазу Si–Ag, а затем подвергнем эту поверхность экспозиции в водороде. Энергия связи Si–H больше, чем Si–Ag. Это значит, что на поверхности образуется поверхностная фаза кремний–водород, а атомы серебра, вытесненные

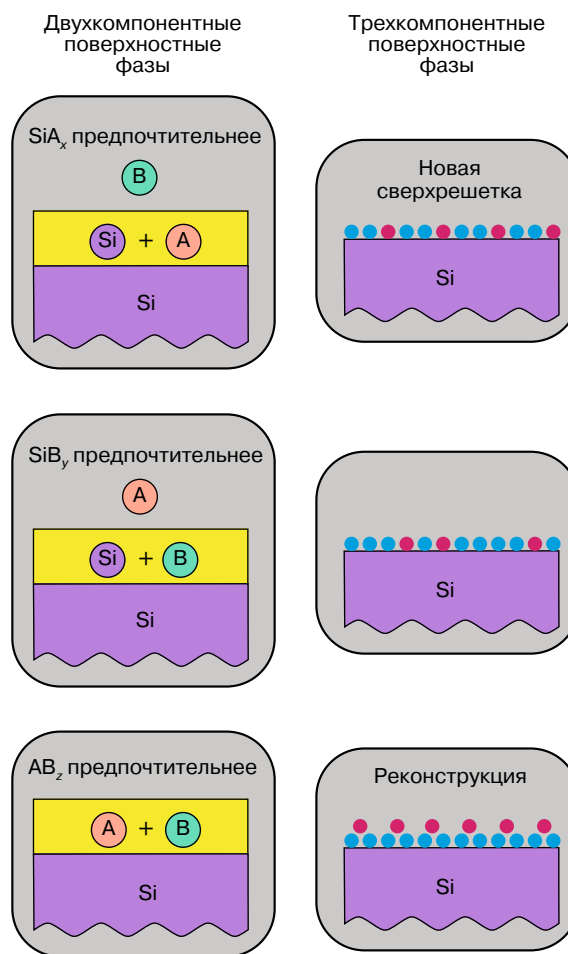


Рис. 2. Ситуации, возникающие при соадсорбции двух сортов чужеродных атомов на кремний

из поверхностной фазы и теперь слабо связанные, соберутся в островки. Но если поверхность нагреть и десорбировать атомы водорода, атомы серебра снова продифундируют по поверхности кремния из островков, образовав поверхностную фазу. Если вместо водорода использовать, например, индий, произойдет абсолютно тот же процесс, так как фаза кремний–индий, так же как и фаза кремний–водород, имеет большую энергию связи, чем фаза кремний–серебро. А многие металлы, например алюминий, ведут себя так же, как серебро, – вытесняются водородом, индием. Конечно, каждый металл имеет свои особенности. Если десорбировать водород при температурах 500°C, то на поверхности при таком отжиге вновь окажется поверхностная фаза кремний–серебро. Но диффузия алюминия при таких температурах идет гораздо медленнее, и, стало быть, в этом случае на поверхности останутся лишь островки алюминия, пространство между которыми покрыто чистым кремнием (рис. 3).

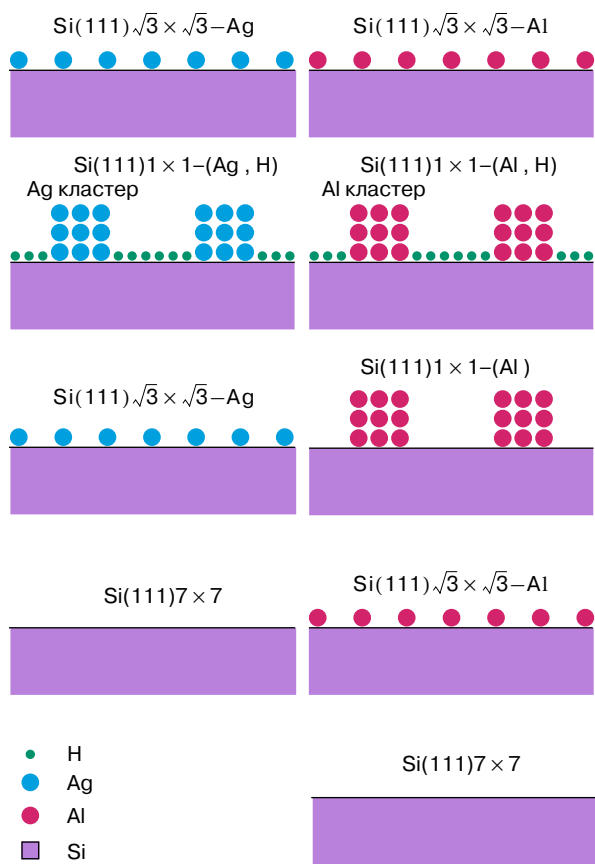


Рис. 3. Схематическая иллюстрация агломерации одного слоя Al и Ag, вызванной взаимодействием с атомарным водородом и последующим отжигом при различных температурах

Мы говорили о случае, когда кремний “выбирает” элемент А или В. А что произойдет, если энергия системы из трех элементов (Si, А, В) будет минимальна при формировании поверхностной фазы А–В? Иными словами, в ряду поверхностных фаз Si–А, Si–В, А–В энергия связи у фазы А–В максимальна? В этом случае кремний окажется несвязанным с атомами А или В, а элементы А и В образуют поверхностную фазу на кремниевой подложке. И действительно, удалось организовать такой эксперимент, подобрав элементы А и В с большой энергией связи. Это были алюминий и азот. Атомы алюминия и азота сформировали на поверхности поверхностную фазу на монокристаллическом кремнии, причем поверхностные атомы самого кремния остались несвязанными с атомами сортов А и В. Это означает, что субмонослойная пленка нитрида алюминия находится на поверхности монокристаллического кремния и с ним практически не связана, следовательно, может быть легко десорбирована с поверхности кремния. Это уже важно и для практики. Фактически мы здесь обсудили способ низкотемпе-

ратурной очистки поверхности кремния от азотных загрязнений. И не только для азотных, естественно.

Формирование трехкомпонентных поверхностных фаз

Рассмотрим случаи, когда наиболее выгодным для системы оказывается формирование поверхностных фаз, состоящих из трех компонентов. Мы уже упоминали, что в объеме такие случаи реализуются довольно часто. Приведем несколько типичных примеров.

Первый класс таких трехкомпонентных поверхностных фаз – новые кристаллические структуры. Такая структура с решеткой 3×1 реализуется при соадсорбции золота и индия на поверхность Si(111) и не возникает при напылении на поверхность кремния только золота или только индия. Это кристаллическая решетка нового трехкомпонентного соединения.

Другой пример – двумерный твердый раствор замещения. Напомним, что когда говорится о твердом растворе замещения для массивных материалов, то под этим понимается ситуация, когда часть атомов в кристаллической решетке какого-либо материала замещена атомами иного сорта. Аналогично будем полагать, что если в какой-либо поверхностной фазе часть атомов заменена атомами другого сорта, а решетка в результате такой замены не изменилась, то на поверхности образовался двумерный твердый раствор. Оказывается, такая ситуация возможна и реализуется, например, при напылении малого количества золота на поверхностную фазу кремний–серебро. При этом атомы золота замещают атомы серебра.

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ ФАЗ НА КРЕМНИИ

Электрофизические свойства поверхностных фаз довольно экзотические. Речь даже не идет о том, что в проводимости поверхностных фаз участвуют малые токи: современные приборы позволяют фиксировать и гораздо меньшие. Есть более серьезные проблемы. Во-первых, где производить измерения, например, электропроводности? Если измерять на воздухе, достав образец с поверхностной фазой, то в этом случае измерять придется не свойства поверхностной фазы, а свойства окисла, который немедленно образуется на поверхности. Толщина такого “естественного” окисла достигает 20 \AA , то есть уже ни о какой поверхностной фазе речи нет. Если измерять прямо в сверхвысоком вакууме, необходимо создать специальное оборудование, причем довольно непростое. Сразу скажем, что исследователи идут обоими путями. Во-вторых, что фактически удастся измерить? Этот вопрос, конечно, сразу возникает у экспериментатора. Действительно, пусть даже удалось приделать контакты к такой поверхностной фазе и пропустить ток через образец. Однако

не следует забывать, что очень тоненькая поверхностная фаза расположена на массивном полупроводнике. Таким образом, имеются как бы два проводника: толстый и тонкий. Нетрудно догадаться, по какому в основном побегут электроны и дырки и свойства чего мы будем измерять. Конечно, измерим характеристики подложки. Однако бороться против этих неприятностей можно. Напомним, что кремний представляет собой полупроводник с довольно широкой запрещенной зоной (ширина запрещенной зоны у чистого, нелегированного кремния составляет более 1 эВ). И если охладить кремниевую подложку до температур жидкого гелия, то в таких условиях из валентной зоны в зону проводимости кремния электроны забрасываться уже не будут. А это и означает, что не будет носителей зарядов в зоне проводимости и ток через кремниевую подложку не пойдет. Еще раз отметим, что надо использовать “собственный”, то есть нелегированный, кремний, так как в легированном кремнии носители заряда, имеющиеся из-за присутствия примесных атомов, могут быть заброшены в зону проводимости и при низких температурах. Значит, при низких температурах ток через кремниевую подложку не потечет, а потечет через поверхностную фазу, что и требуется экспериментатору.

Итак, ясно, как избавиться от проводимости по подложке. И хотя в сверхвысоком вакууме охладить образец до температур жидкого гелия, нанести специальные контакты и измерить проводимость и подвижность носителей весьма непросто, это уже делают, причем в нашей стране, в Институте физики твердого тела, в Черноголовке Московской области.

Однако есть и более простой выход – проводить измерения на воздухе, но, чтобы поверхностная фаза не испортилась, прикрыть ее в сверхвысоком вакууме пленкой, например кремния. Конечно, на воздухе кремниевая пленка сверху окислится, но сопротивление окисла (диэлектрика) существенно больше сопротивления кремния, то есть ток по пленке окисла тем более не потечет, если будут “выморожены” носители в кремниевой матрице. Лишь бы поверхностная фаза не испортилась из-за окисления, для чего надо просто пленку кремния сверху сделать потолще. Более серьезная проблема – не испортить поверхностную фазу напылением сверху кремниевой пленки. В ряде случаев и эта проблема решается.

Такую структуру нам удалось вырастить – структуру со “встроенными” в массивный материал поверхностными фазами индия, сурьмы, бора и хрома. В мировой литературе такие поверхностные фазы называются захороненными. Было очень интересно узнать, какая же проводимость у поверхностных фаз. Как и для массивных образцов, оказалось, что самая разная. Например, поверхностная фаза $\text{Si}(111)7 \times 7$ чистого кремния (типичнейшего полупроводника) обладает металлической прово-

димостью. Это связано с наличием в этой фазе так называемых электронов торчащих связей (это та электронная связь, которая “торчит” вверх у самых верхних атомов кремния). Иными словами, произошла коллективизация этих электронов и уже невозможно различить, к какому атому принадлежит какой-либо электрон. Это и определяет металлический характер проводимости этой поверхностной фазы. А в ряде двухкомпонентных фаз проводимость оказывается полупроводниковой. То, что некоторые поверхностные фазы являются полупроводниками, вселяет оптимизм в исследователей и технологов. Во-первых, это значит, что в принципе можно создавать такие полупроводниковые приборы на плоской поверхности. А во-вторых, поскольку такие приборы будут малой толщины, можно вырастить таких слоев с такими приборами очень много.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ И ТВЕРДОФАЗНАЯ ЭПИТАКСИЯ

Конечно, хорошо бы вырастить такую слоистую структуру со встроенными поверхностными фазами, из которых в слоях сформированы двумерные полупроводниковые приборы. Вспомним, однако, что поверхностная фаза формируется на монокристаллической подложке. И если первый слой с поверхностной фазой на монокристаллической подложке может быть выращен легко, то после этого сверху необходимо будет вырастить следующий монокристаллический слой, например того же кремния, и формировать следующий слой с поверхностными фазами уже на нем. А что при этом станет с поверхностной фазой в первом слое? Да и как вырастить монокристаллическую пленку в вакууме? Ответим сначала на последний вопрос.

Ориентированное наращивание называют *эпитаксией*. Существует *гомоэпитаксия*, когда на подложке производят ориентированное наращивание материала подложки, и *гетероэпитаксия*, когда на подложке ориентированно выращивают некоторый иной материал. В вакууме известны два вида эпитаксии: молекулярно-лучевая (МЛЭ) и твердофазная эпитаксия (ТФЭ). Рассмотрим каждую из них на примере эпитаксии на кремнии.

В методе МЛЭ осуществляется напыление кремниевых атомов на атомарно-чистую кремниевую подложку, причем напыление производят медленно, а подложку делают относительно горячей. Физическая идея такого напыления состоит в том, чтобы при напылении одного монослоя кремниевых атомов атомы этого слоя успели упорядочиться и образовать монокристаллическую пленку до того, как произойдет напыление следующих слоев кремния и процесс поверхностной диффузии в первом напыленном слое, с помощью которого и происходит процесс упорядочения, перестанет быть возможным. После чего процесс упорядочения, то есть формирования энергетически более выгодной

монокристаллической пленки, может происходить лишь за счет процесса объемной диффузии, который, конечно, идет с гораздо меньшей скоростью, и в реальном масштабе времени формирование монокристаллической пленки может и не произойти.

Метод ТФЭ заключается в нанесении слоя кремния с высокой скоростью и при относительно низких (например, комнатных) температурах подложки. При этом на поверхности кремния образуется слой аморфного кремния. При температурах отжига 500–600°С происходит эпитаксиальная кристаллизация, которая начинается от подложки, после чего граница кристаллизационного фронта слой за слоем движется к поверхности. Происходит кристаллизация в твердой фазе, откуда появилось и название процесса.

СВЕРХРЕШЕТКИ С ПОВЕРХНОСТНЫМИ ФАЗАМИ

Теперь, рассмотрев оба вида эпитаксии, мы понимаем, как вырастить микроструктуру со встроенными поверхностными фазами. В последнее время подобные структуры весьма привлекают исследователей, так как представляют собой новый материал для микроэлектроники. Сейчас уже достаточно хорошо описаны в литературе сверхрешетки (именно так называются слоистые структуры с эпитаксиальными слоями). В таких сверхрешетках часто используют дельта-легированные слои, то есть достаточно тонкие слои толщиной в десятки ангстрем, в которых слои кремния имеют уровень легирования примесей и (или) их тип, отличный от таковых в основной матрице.

Новый тип сверхрешеток получен нами совсем недавно — сверхрешетки со встроенными поверхностными фазами. Из всего предыдущего понятно, что этот случай отличен от случая дельта-легированного слоя. В дельта-легированном слое речь идет о кремниевом слое, пусть и очень тонком. В случае сверхрешеток с поверхностными фазами в качестве дельта-слоя используется не кремний, а новое двумерное вещество со своей кристаллической и электронной структурой.

Для выращивания таких сверхрешеток следует использовать метод ТФЭ. Именно при использовании этого метода есть шанс сохранения поверхностной фазы при выращивании следующего эпитаксиального слоя кремния, тогда как при использовании метода МЛЭ таких шансов просто нет из-за сегрегации атомов из поверхностной фазы к поверхности.

Два главных вопроса остаются при использовании метода ТФЭ для выращивания сверхрешеток с поверхностными фазами. Первый вопрос о кристаллическом совершенстве слоев кремния, выращенных на поверхностных фазах. Эксперименты показали, что качество эпитаксии не зависит от того, на чистом кремнии производили твердофазную

эпитаксию или на поверхностной фазе. Вторым вопросом оказался более серьезным — о сохранении поверхностных фаз под выращенным слоем кремния. Дело в том, что, как только мы напылим слой аморфного кремния на поверхностную фазу, она уже перестанет быть на поверхности, а следовательно, перестанет находиться в состоянии термодинамического равновесия. Чтобы такое равновесие наступило, атомы из поверхностной фазы должны покинуть свои позиции и начать диффундировать к поверхности. Но дело в том, что для этого поверхностную фазу надо разрушить. А если она окажется достаточно устойчивой, сверхрешетка может получиться. Не важно, что при этом поверхностная фаза не будет в равновесных условиях — многие свойства у нее сохранятся.

Поэтому были предприняты поиски стабильных поверхностных фаз. Поверхностные фазы должны быть стабильны, во-первых, к напылению аморфного кремния и, во-вторых, к отжигу для эпитаксиальной кристаллизации кремниевых слоев. Оказалось, что наиболее стабильна из пока известных поверхностных фаз фаза кремний–бор. Но, и используя поверхностную фазу кремний–сурьма, оказалось возможным вырастить сверхрешетку с пятью слоями с поверхностными фазами кремний–сурьма, разделенными эпитаксиальными кремниевыми слоями толщиной 200 Å (рис. 4). Конечно, и электрофизические характеристики таких структур были изучены, но это уже предмет другого разговора.

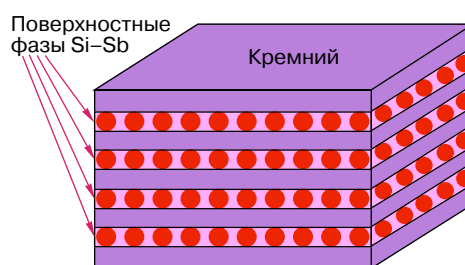


Рис. 4. Сверхрешетка кремния со встроенными поверхностными фазами кремний–сурьма

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой статье мы рассмотрели, как получают поверхностные фазы и как строятся диаграммы состояний с поверхностными фазами. Обсудили, как можно измерять электрофизические характеристики поверхностных фаз и как модифицировать поверхностные фазы добавлением третьего компонента. Наконец, поняли, как вырастить микроэлектронные структуры с поверхностными фазами. По сути дела, это статья о двумерном полупроводниковом материале в состоянии, то есть той области знаний, которая сейчас только создается и скоро начнет использоваться. Здесь мы рассматривали только вопросы,

как сделать новый сверхтонкий полупроводниковый материал. Остаются проблемы: как из этого двумерного материала сделать двумерные полупроводниковые приборы, схемные слои и т.д. Например, зная, что некоторые из поверхностных фаз обладают полупроводниковой проводимостью, причем имеют различные числа носителей зарядов и ширины запрещенных зон, легко представить, что из таких двух новых полупроводниковых материалов можно сделать полупроводниковый прибор нового типа — двумерный диод, организовав контакт поверхностных фаз на плоскости. Такой контакт будет линейным, а не плоским, как это обычно практикуется в микроэлектронике. Также можно вести речь и об организации других, более сложных плоских микроструктур с использованием квантовых проволок, квантовых ям и др. Сложности с микролитографией при этом можно обойти используя так называемые самоорганизующиеся структуры, то есть такие, которые образуются без дополнительного вмешательства и имеют нужные размеры. Иногда для создания полупроводниковых приборов атомных размеров используется туннельная микроскопия [6]. Очевидно, что развитие описанного направления не только приведет к повышению интегральной плотности функциональных элементов в полупроводниковой микроэлектронике, но и существенно расширит возможности технологов, так как даст возможность использования обилия новых материалов (двумерных), обладающих весьма перспективными свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Лифшиц В.Г.* Поверхность твердого тела и поверхностные фазы // Соросовский Образовательный Журнал. 1995. № 1. С. 99–107.
2. *Lifshits V.G., Saranin A.A., Zotov A.V.* Surface Phases on Silicon: Preparation, Structures and Properties. L.: John Wiley and Sons, 1994. 460 p.
3. *Шульман А.Р., Фридрихов С.А.* Вторично-эмиссионные методы исследования твердого тела. М.: Наука, 1977. 551 с.
4. *Трейси Д.К., Баркстренд Д.М.* Успехи в исследовании поверхности методами дифракции медленных электронов и электронной оже-спектроскопии. В кн.: Новое в исследовании поверхности твердого тела. М.: Мир, 1977. Вып. 2.
5. *Practical Surface Analysis by Auger and X-ray Photoelectron Spectroscopy / Ed. D. Briggs, M.P. Seah.* L.: John Wiley and Sons, 1983.
6. *Binning G., Rohrer H.* // Surface Sci. 1983. Vol. 126. P. 236.

* * *

Виктор Григорьевич Лифшиц, доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой физики и технологии материалов полупроводниковой микроэлектроники Дальневосточного государственного университета, зав. отделом Института автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН. Область научных интересов: физика поверхности твердых тел. Автор более 150 научных статей и двух монографий.