

Белорусский национальный технический университет

Приборостроительный факультет

Кафедра «Микро- и нанотехника»

Электронный учебно-методический комплекс
по учебной дисциплине

«ФИЗИКА ПОВЕРХНОСТИ»

для студентов I ступени получения высшего образования
специальности 1-38 01 04 «Микро- и наносистемная техника»

Составитель: Щербакова Елена Николаевна

Минск БНТУ 2023

Перечень материалов

Электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) по учебной дисциплине «Физика поверхности» состоит из следующих разделов:

I. Теоретический раздел:

– курс лекций.

II. Практический раздел:

– перечень тем практических занятий.

III. Контроль знаний

– перечень вопросов, выносимых на экзамен,

– перечень вопросов с вариантами ответов для электронного теста.

IV. Вспомогательный раздел:

– учебная программа для учреждения высшего образования.

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Цели создания ЭУМК:

Целью ЭУМК по дисциплине «Физика поверхности» является формирование у студентов комплекса знаний по изучаемой учебной дисциплине, соответствующих академическим, социально-личностным и профессиональным компетенциям специалиста в рамках образовательного стандарта для специальности 1-38 01 04 «Микро- и наносистемная техника».

Особенностями структурирования и подачи учебного материала являются изучение следующих теоретических материалов:

- описание принципов построения геометрических конфигураций поверхностей различных материалов;

- изучение взаимодействия поверхности с адсорбатом, физических и химических явлений, происходящих на границе раздела фаз, в поверхностных и приповерхностных слоях твердых материалов, основных методов исследования поверхности.

Практическая часть состоит из перечня тем практических занятий.

Раздел контроля знаний содержит вопросы к экзамену и вопросов с вариантами ответов для электронного теста.

Вспомогательный раздел содержит учебную программу по дисциплине «Физика поверхности».

Рекомендации по организации работы с ЭУМК: Материалы данного электронного учебно-методического комплекса можно использовать в качестве методической поддержки при проведении лекционных и практических занятий для закрепления и углубления знаний, для самостоятельной работы подготовки студентов к экзамену.

Содержание

I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	5
1. Предмет дисциплины. Внутренние и внешние поверхности. Основные факторы, повлиявшие на развитие физики поверхности.....	5
2. Основные процессы, связанные с физикой поверхности твердых тел ...	7
3. Характерные черты установок для получения СВВ.....	9
4. Понятие атомарно-чистой и технологически чистой поверхности и методы получения атомарно чистых поверхностей	10
5. Элементы симметрии кристаллов. Понятие и обозначение осей симметрии различного порядка, плоскостей и центра симметрии. Их количество в кубической решетке	12
6. Кристаллографические сингонии. Кристаллическая решетка	13
7. Двумерные и трехмерные решетки Браве	14
8. Определение, физический смысл и построение решетки Вигнера-Зейтса. Физический смысл обратной решетки	16
9. Типы атомной перестройки поверхности – релаксация и реконструкция поверхности. Их виды.....	17
10. Движущие силы реконструкции и релаксации. Механизм образования димеров на кремнии	18
11. Сложные поверхности монокристаллов. Обозначение ступенчатой поверхности	19
13. Кристалл Кёсселя. Величина энергии связи атомов в характерных положениях на поверхности.....	22
14. Доля поверхностей раздела и межзеренных границ в консолидированных наноматериалах. Особенности структуры.....	23
15. Влияние размера зерна на общую долю поверхностей раздела, долю межзеренных границ и тройных стыков.....	24
16. Виды и механизмы диффузии. Поверхностная диффузия	26
17. Объемная диффузия вблизи поверхности. Основные уравнения.....	27
18. Диффузия по поверхности отдельного атома и химическая диффузия	28
19. Поверхностная диффузия кластеров. Коллективный и индивидуальный механизмы.....	29
20. Поверхностная структура металлов. Взаимодействие частиц с поверхностью подложки.....	31
21. Понятие адсорбат, кромка и суперструктура. Запись структуры поверхности. Матричная запись	33
23. Электронная структура поверхности. Таммовские состояния и состояния Шокли.....	37
24. Поверхностная проводимость. Четырехзондовый метод измерения поверхностного сопротивления.....	38
25. Сопротивление как функция расстояния между зондами. Профили сопротивления	40
26. Модель ТСИ. Энергия образования адатома и вакансии.	42

27. Выходы на поверхность краевых и винтовых дислокаций. Сингулярные и вицинальные поверхности. Формирование пирамид роста.....	43
28. Влияние поверхности на работу полупроводниковых приборов	45
29. Фасетированные поверхности	46
30. Пористый кремний. Люминесценция и флюоресценция.....	48
31. Понятие адсорбции и сорбции.....	50
32. Общие понятия о физической и химической адсорбции.....	51
33. Связывание молекул с поверхностью. Стадии взаимодействия молекул с поверхностью.....	52
34. Основные характеристики процесса адсорбции.....	53
35. Механизмы физической адсорбции	54
36. Механизмы взаимодействия атомов при физической адсорбции.....	56
37. Энергия взаимодействия атома поверхности и молекулы адсорбата при физической и химической адсорбции	57
38. Основные механизмы хемосорбции на твердых телах (4 случая взаимодействия)	58
39. Основные теории адсорбции	60
40. Скорость адсорбции.....	62
41. Процессы десорбции. Скорость десорбции	64
42. Общие представления о методах анализа поверхности.....	66
42. Физические явления, лежащие в основе диагностики поверхности ...	67
43. Ионное распыление и вторичная ионная эмиссия.....	68
44. Термо-ионная эмиссия.....	69
45. Полевая ионная эмиссия.....	70
46. Вторичная электронная эмиссия	71
47. Оже-электронная эмиссия. Оже-процесс	73
48. Термо-электронная эмиссия.....	75
49. Ионно-электронная эмиссия	77
50. Полевая электронная эмиссия	79
51. Фотоэлектронная эмиссия.....	80
52. Рентгеновское излучение в исследовании поверхности. Закон Мозли.....	81
53. Основные экспериментальные особенности и узлы аналитических установок для исследования поверхности.....	83
II. ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ.....	84
III. КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ	85
1. Вопросы к экзамену по дисциплине «Физика поверхности».....	85
2. Вопросы с вариантами ответов к тесту по дисциплине «Физика поверхности»	87
IV. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ	138

I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

1. Предмет дисциплины. Внутренние и внешние поверхности. Основные факторы, повлиявшие на развитие физики поверхности

Основная цель дисциплины заключается в изучении современных представлений об основных процессах, протекающих на поверхности твердых тел, а также современных методов исследования поверхности, основанных на взаимодействии электронов, ионов и фотонов с ней.

Предметом физики поверхности является исследование структуры, химического состава и взаимного расположения атомов на поверхности твердых тел, а также теоретическое и экспериментальное изучение механических, электронных и химических свойств тонких, порядка нескольких атомов, поверхностных слоев, прилегающих к границе раздела. Как и в случае объемных тел, конечная цель исследования - установление связи между свойствами, составом и структурой.

Поверхность твердого тела имеет свойства, отличные от свойств объемного материала. Существует множество технологических процессов, используемых в микро- и нанотехнике, которые могут быть существенно улучшены, когда есть ясное понимание природы поверхностных процессов и роли структурной организации поверхностей твердых тел на атомном уровне.

В настоящее время под поверхностью понимается верхний атомный слой твердого тела. Во многих старых монографиях поверхностью считался верхний слой твердого тела толщиной до 100 нм, который определялся возможностями физических методов исследований.

Термин «поверхность» может использоваться в *макроскопическом* смысле, т.е. под ним подразумевается обычная поверхность, которая может существовать в нормальных внешних условиях, будучи создана с помощью обычных макроскопических методов типа резки, полировки, травления (рис. 1.1).

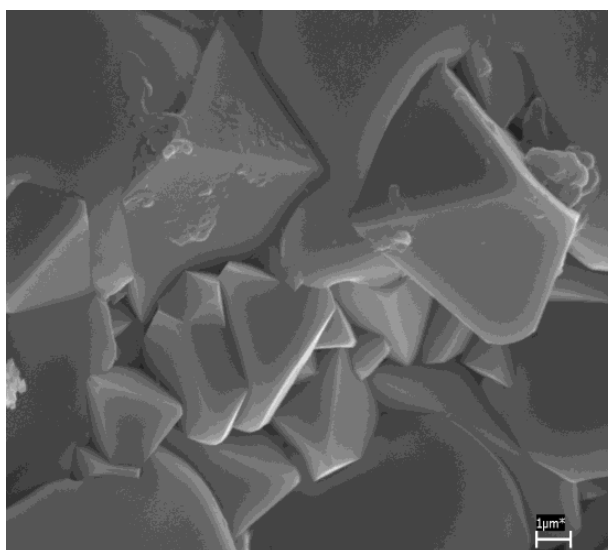


Рисунок 1.1 - Реальная поверхность керамики

Поверхность в *микроскопическом* смысле слова можно представить себе как резкий переход от объема кристалла к идеальному вакууму. На атомарном уровне граница между двумя объемными фазами не может быть описана просто как двумерная математическая модель, не имеющая поперечных размеров. Более корректно рассматривать поверхность как область определенной толщины, зависящей от радиуса действия межатомных или межмолекулярных сил. В эту область входят, как минимум, атомы или молекулы из самого верхнего граничного слоя соответствующей конденсированной фазы.

Различают также *внутренние* и *внешние* поверхности. Внутренние поверхности – это границы зерен в твердом теле и границы частиц в коллоидных растворах. Внешние поверхности – непосредственно поверхности твердого тела, а также p-n переходы.

Основные факторы, повлиявшие на развитие физики поверхности:

1. Возможность достижения сверхвысокого вакуума (СВВ). СВВ - это такой уровень вакуума, при которой адсорбцией молекул остаточных газов на изучаемой поверхности на время эксперимента можно пренебречь;
2. Давление со стороны технологий: развитие микроэлектроники и космических исследований. Такие важнейшие современные технологии микро- и наноэлектроники как молекулярная эпитаксия, ионное легирование, лазерная обработка материалов, тесно связаны с явлениями на поверхности твердого тела;
3. Развитие теории зонной структуры и химической связи.

2. Основные процессы, связанные с физикой поверхности твердых тел

На поверхности происходит много различных процессов, представляющих интерес, как с научной, так и технологической точки зрения. Основные из них:

- *Термоэлектронная эмиссия* – испускание электронов при увеличении температуры. Если повышать температуру металла, то электронам, находящимся у верхнего края зоны проводимости может быть сообщена достаточная кинетическая энергия чтобы они вылетали из поверхности в вакуум. Этот процесс играет важную роль во многих электронных приборах, но наиболее часто используется как источник электронных пучков в электронно-лучевых трубках и электронных микроскопах. Число электронов, которое может быть вырвано из катода с помощью термоионной эмиссии есть функция не только материала катода, но также наличия химических примесей на эмиттирующей поверхности (ее чистоты) и ее кристаллографической ориентации. Изучение факторов, позволяющих контролировать электронную эмиссию составляет важную часть физики поверхности.

- *Выращивание кристаллов.* Развитие методов выращивания монокристаллов для самых разнообразных типов твердых тел сыграло решающую роль для перехода физики твердого тела от этапа простейших зонных моделей к способности инженеров конструировать электронные приборы. Обычно процесс выращивания кристалла представляет собой осаждение атомов на монокристаллические поверхности при таких условиях, чтобы поступающие атомы могли свободно передвигаться и образовывать трехмерную периодическую структуру. Таким образом изучение энергетики и кинетики адсорбционных атомов на поверхности монокристаллов есть фундамент для понимания кристаллического роста.

- *Химические реакции.* Многие химические реакции протекают путем взаимодействия между различными типами атомов на поверхности или границе раздела двух твердых тел. Один из особенно важных примеров – это коррозия металлов, и один из самых простых случаев коррозии – окисление, которые необходимо учитывать при

- *Катализ.* Присутствие при протекании химической реакции поверхности определенного металла может иногда вызывать заметное возрастание скорости реакции, что важно для технологических целей и является предметом исследований. Одна из целей исследований – определить, как работают сложные каталитические системы, используемые на практике, с точки зрения обнаружения более экономичных катализаторов.

- *Коллоидные растворы.* Частицы твердого тела микронных размеров, взвешенные в жидкости – коллоидная суспензия – образуют интересную и полезную химическую систему. Многие ее специфические свойства происходят от большой суммарной поверхности частиц и понимание ее поведения должно основываться на знании роли этой поверхности.

- *Полупроводниковые границы раздела.* Работа большинства полупроводниковых приборов критически зависит от явлений, происходящих на поверхности или границы раздела фаз. Свойства р-п переходов, контактов между оксидом металла и полупроводником (МОП-приборы), контактов между металлом и полупроводником определяют свойства получаемых транзисторов, диодов и т.д.

- *Хрупкий излом.* Многие материалы обладают огромной механической прочностью, если к ним прикладывается постоянная нагрузка, но они могут разрушаться при резком воздействии гораздо меньшей нагрузки – это явление называется хрупкий излом. Он обусловлен миграцией примесных атомов на границе зерен вследствие поверхностной сегрегации, которая становится слабым местом при ударной нагрузке. Изучение сегрегации позволяет понимать данную проблему и привело к открытию способов замедления диффузии примесей и тем самым к предотвращению хрупкого излома в материалах.

3. Характерные черты установок для получения СВВ

1. Вакуумная камера и отходящая от нее система трубопроводов обычно изготавливаются из нержавеющей стали, сваренной аргоно-дуговым способом, или из вакуумированной стали. Этот материал очень медленно корродирует и медленно выпускает из себя растворенные газы.

2. Вакуумные уплотнения делаются из металла, а не из эластомера. Здесь обычно используют плоские медные кольца. Использование металлических прокладок предотвращает попадание органических компонент в вакуум, уменьшает просачивание водяного пара из атмосферы и позволяет проводить прогрев системы.

3. Весь агрегат вакуумной камеры сконструирован так, что его можно прогреть примерно до 470 К при работающих вакуумных насосах. Этот обжиг системы приводит к ускорению десорбции водяного пара (и других газов) со всех внутренних поверхностей. Когда система охлаждается обратно до комнатной температуры, то нижняя достижимая граница давления становится существенно ниже, чем до прогрева.

4. Насосы, используемые для вакуумной откачки, чаще всего являются ионными, титановыми сублимационными и сорбционными. Все три способа откачки не используют никаких органических веществ.

5. Материалы, используемые внутри вакуумной камеры, не должны давать высокого давления насыщенных паров (проводники – медь, изоляторы – высокоплотная керамика).

6. Необходимо наличие шлюзов для уменьшения объема откачки и быстрой замены образцов. Шлюз – это устройство, которое позволяет нам разгерметизировать при смене образцов не всю камеру, а только часть объема.

7. Наличие манипулятора – устройства, которое позволяет вращать, перемещать, нагревать, охлаждать, производить скол и т.д.

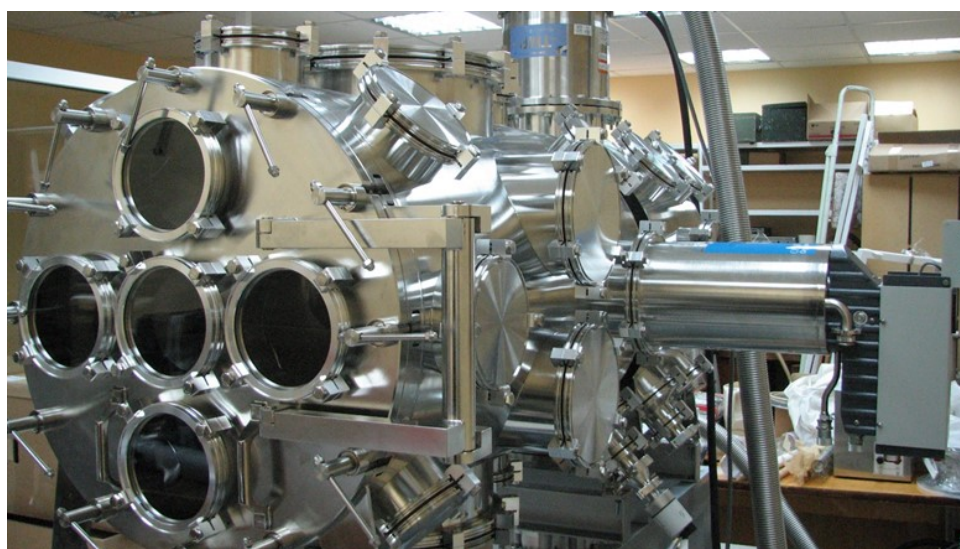


Рисунок 3.1 – Внешний вид установки для получения СВВ

4. Понятие атомарно-чистой и технологически чистой поверхности и методы получения атомарно чистых поверхностей

Поверхность называется *атомарно-чистой*, если концентрация посторонних атомов на ней ниже предела чувствительности используемого метода химического анализа, и *атомарно-гладкой*, если характерный масштаб неровностей составляет один атомный диаметр.

Создание атомарно-чистых и гладких поверхностей, а также поддержание их в идеальных условиях требует затраты очень больших усилий и связано с разработкой методов получения и методов анализа химического состава и структуры поверхности на атомарном уровне. Для сохранения атомарно чистой поверхности в процессе эксперимента необходимо поддерживать сверхвысокий вакуум (СВВ) с остаточным давлением 10^{-9} – 10^{-10} Па.

Технологически чистая поверхность – это поверхность, которая имеет концентрацию примесей, не препятствующую воспроизводимому получению заданных значений и стабильности параметров, получаемых изделий.

Способы получения атомарно чистых поверхностей:

1. *Метод скола в сверхвысоком вакууме* (рис.4.1) применяется для получения атомарно чистой поверхности в случае материалов, которые легко расщепляются по определенным кристаллографическим плоскостям (оксиды, галогениды щелочных металлов, полупроводники, слоистые соединения). Например, монокристаллы германия и кремния раскалываются вдоль плоскости (111), полупроводники типа $A_{III}B_{V}$ (InSb, InAs, GaAs, GaSb) расщепляются вдоль плоскости (110).

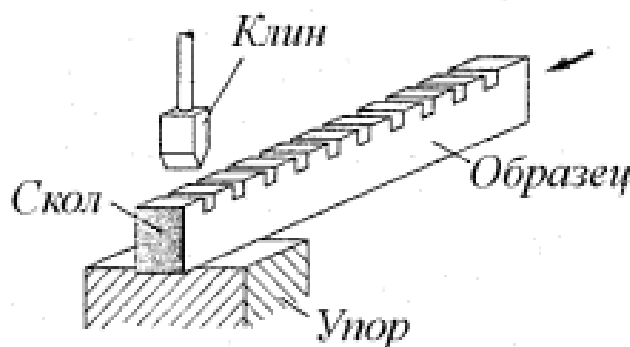


Рисунок 4.1. Схема устройства для многократного скалывания монокристаллического образца в вакууме

2. *Нагрев поверхности в сверхвысоком вакууме* приводит к десорбции адсорбированных частиц. Для многих материалов температура десорбции меньше температуры плавления материала, однако в ряде случаев из-за очень сильной связи адсорбата с поверхностью его не удастся удалить полностью нагревом до температур, меньших температур плавления образца. Поэтому

способ термической очистки используется главным образом для вольфрама и аналогичных тугоплавких материалов.

3. Некоторые загрязнения нельзя убрать нагревом в вакууме, но можно удалить *нагреванием в атмосфере, которая образует летучие соединения* (атмосфера водорода).

4. Стойкие поверхностные примеси удаляют *бомбардировкой ионами аргона*. Но бомбардировка сопровождается нарушением порядка в расположении поверхностных атомов. Поверхность можно снова упорядочить с помощью отжига, но на поверхности возникнут примеси вследствие поверхностной сегрегации – диффузии из объема на поверхность. Следует эмпирически, т.е. опытным путем подбирать условия бомбардировки и отжига для оптимального результата.

5. Непосредственное *формирование пленки* исследуемого вещества в СВВ камере.

5. Элементы симметрии кристаллов. Понятие и обозначение осей симметрии различного порядка, плоскостей и центра симметрии. Их количество в кубической решетке

Плоскость симметрии – это воображаемая плоскость, которая делит кристалл на две зеркально равные части. Обозначение Р. Характерно 9 плоскостей симметрии (9Р).

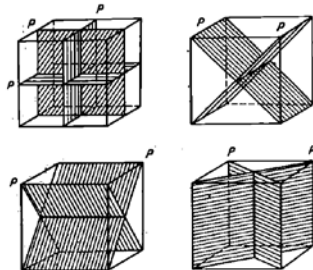


Рисунок 5.1 – Виды плоскостей симметрии

Ось симметрии – это воображаемая ось, при повороте вокруг которой на 360 градусов элементы кристалла повторяются 2,3,4,6 раз.

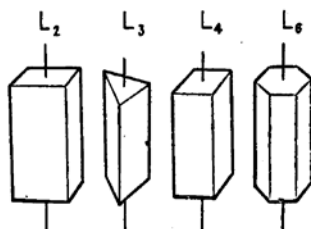


Рисунок 5.2- Виды осей симметрии

Для куба $3L_4 4L_3 6L_2 9P_c$

Центр симметрии – это условная точка внутри кристалла, расположенная на равных расстояниях от элементов ограничения кристалла. Обозначение С.

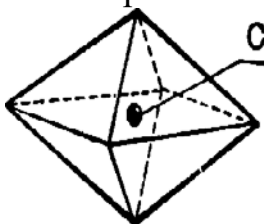
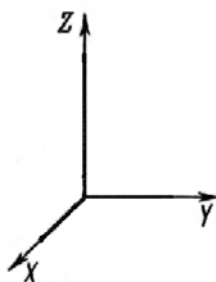


Рисунок 5.3-Центр симметрии в кристалле

Для изучения кристаллов принято следующие изображения кристаллографических осей.



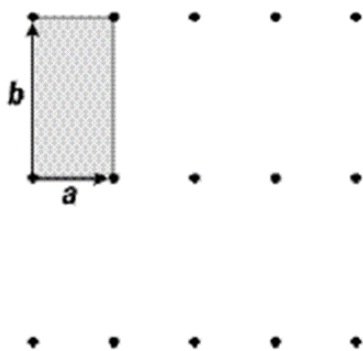
6. Кристаллографические сингонии. Кристаллическая решетка

Формы кристаллов чрезвычайно разнообразны, их насчитывается около 7000, но их всех можно сгруппировать в 7 систем или сингонии (сходногоугодности). В каждую сингонию попадают кристаллы с одинаковыми углами между кристаллографическими осями, обладающие в связи с этим одним или несколькими сходными элементами симметрии.

Название сингоний	Характеристика сингоний		
	По кристаллографическим осям	По элементам симметрии	
		Максимальный показатель	Минимальный показатель
Кубическая	$a = b = c;$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	$3L^4 4L^3 6L^2 9Pc$	$3L^3 4L^3$ или $4L^3 3L^2$
Гексагональная	$a = b \neq c;$ $\alpha = \beta = 90^\circ \gamma = 120^\circ$	$L^6 6L^2 7Pc$	L^6
Тетрагональная	$a = b \neq c;$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	$L^4 4L^2 5Pc$	L^4
Тригональная	$a = b \neq c;$ $\alpha = \beta = 90^\circ \gamma = 120^\circ$	$L^3 3L^2 3Pc$	L^3
Ромбическая	$a \neq b \neq c;$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	$3L^2 3Pc$	$3L^2$ или $3P$
Моноклинная	$a \neq b \neq c;$ $\alpha = \beta = 90^\circ \gamma \neq 90^\circ$	$L^2 Pc$	L^2 или P
Триклинная	$a \neq b \neq c;$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	C	–

Кристаллическая решетка – это вспомогательный геометрический образ, вводимый для анализов строения кристалла, имеет вид сетки, которая образована путем трансляции (переноса) элементарной ячейки. Узлы решетки совмещают с центрами атомов кристалла.

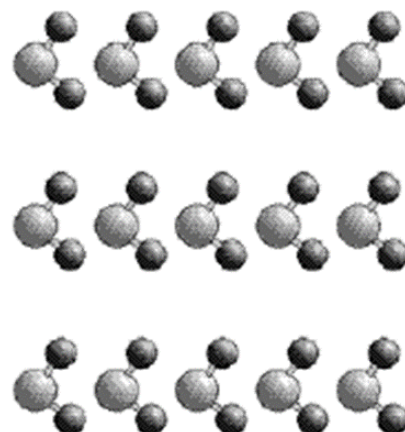
Кристаллическая решетка



Базис



Кристаллическая структура



7. Двумерные и трехмерные решетки Браве

Решетка Браве – это набор элементарных трансляций, которыми может быть получена вся бесконечная кристаллическая решетка.

Различают двумерную и трехмерную решетки Браве.

Двумерные характерны для поверхности:

1. Косоугольная
2. Примитивная прямоугольная
3. Центрированная прямоугольная
4. Квадратная
5. Гексагональная

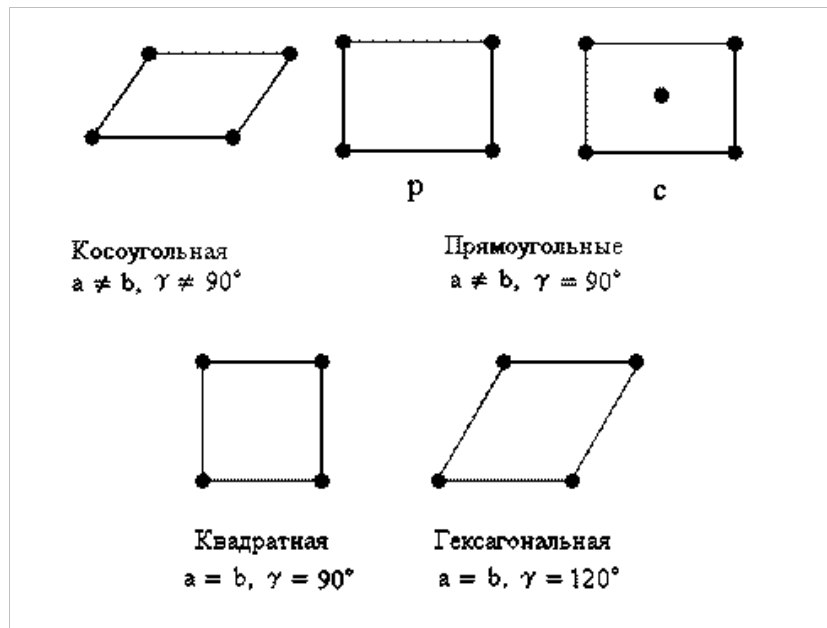


Рисунок 7.1- Виды двумерных решеток

Различают 14 трехмерных решеток Браве, так как не все сингонии имеют все типы решеток с точки зрения геометрии. Различают 4 типа решеток:

1. Примитивная
2. База-центрированная
3. Объемно-центрированная
4. Гранецентрированная

Сингония Тип решётки	Три- клинная	Куби- ческая	Тетраго- нальная	Ромби- ческая	Триго- нальная (ромбоэд- рическая)	Гексаго- нальная	Моно- клинная
Примитивный							
Базоцентри- рованный							
Объёмноцен- трированный							
Гранецентри- рованный							

Рисунок 7.2-Виды трехмерных решеток

8. Определение, физический смысл и построение решетки Вигнера-Зейтса. Физический смысл обратной решетки

Ячейка Вигнера-Зейтса – это область пространства с центром в некоторой точке решетки Браве, которая лежит ближе к этой точке решетки чем к какой-либо другой точке.

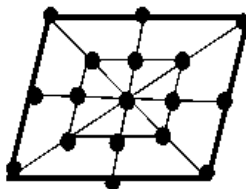


Рисунок 8.1-Решетка Вигнера-Зейтса

На ячейку Вигнера-Зейца приходится 1 узел решётки Браве. Элементарная ячейка обратной решетки в форме ячейки Вигнера – Зейца в обратном пространстве есть первая зона Бриллюэна.

Обратная решетка – это математический образ, который широко применяется для структурного анализа кристаллов в электронной микроскопии и т.д. К каждой плоскости (hkl) прямой решетки в обратном пространстве соответствует точка или узел $hkl \rightarrow [[hkl]]$, расстояние между которыми соответствует расстоянию между плоскостями в реальной решетке.

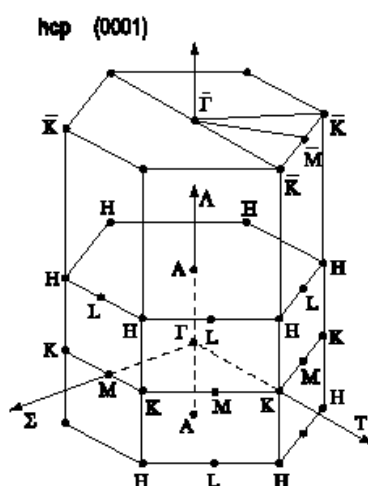


Рисунок 8.2-Плоскости в кристаллической решетке

9. Типы атомной перестройки поверхности – релаксация и реконструкция поверхности. Их виды.

На поверхности наблюдается изменение расположения атомов по сравнению с объемом кристалла. Различают:

1. **Релаксация** – это тип атомной перестройки поверхности, при котором атомная структура сохраняется, но расстояние между слоями либо их взаимное расположение изменяется. Релаксация характерна для металлов.

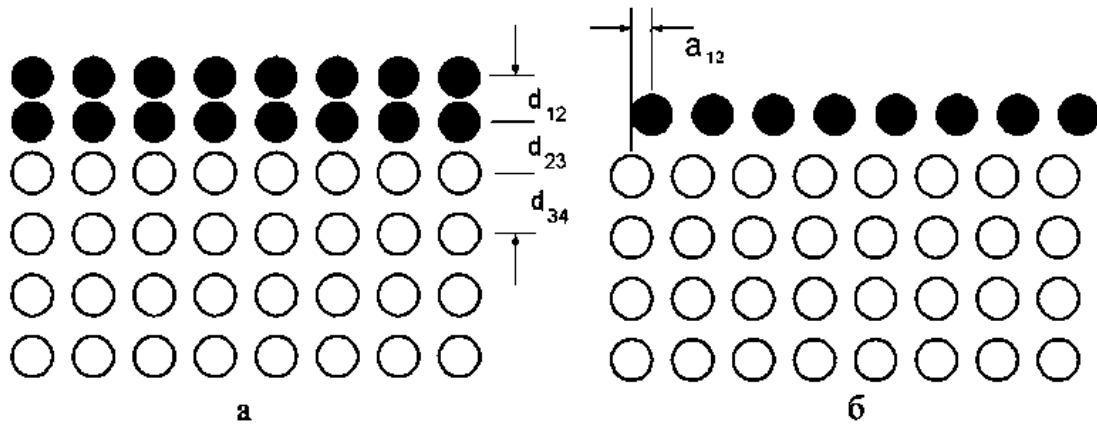


Рисунок 9.1 – Виды релаксации: нормальная (а) и латеральная (б)

2. **Реконструкция** – это тип атомной перестройки поверхности, в результате которой атомная структура поверхностных слоев существенно отличается от объемной структуры кристаллов. Характерно для полупроводников. Может встречаться одновременно с релаксацией.

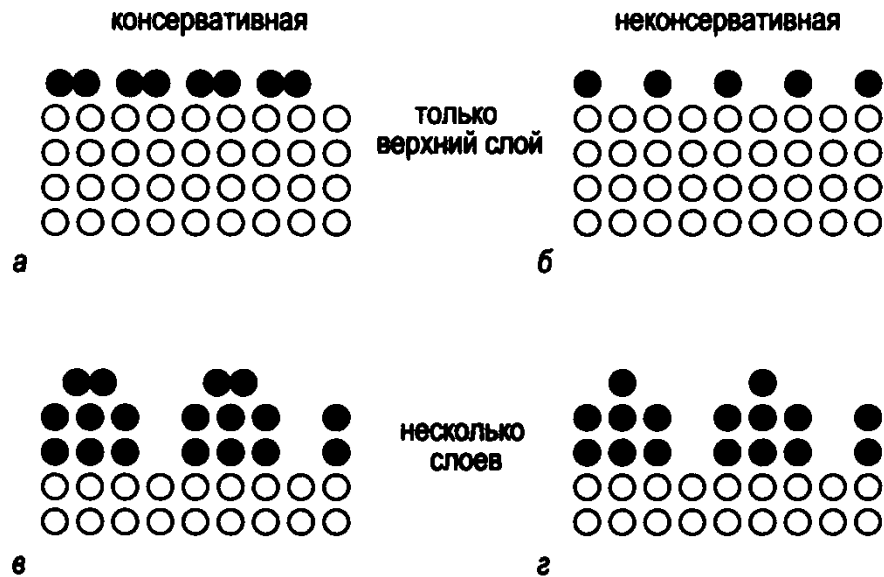


Рисунок 9.2 – Виды реконструкции

10. Движущие силы реконструкции и релаксации. Механизм образования димеров на кремнии

Движущие силы релаксации возникают на атомарном уровне. На атом находящимся в объеме действует силы притяжения, силы отталкивания, которые уравновешены. На атом, находящийся на поверхности из объема кристалла действуют силы притяжения, которых нет сверху, в результате чего верхний слой «втягивается» в кристалл. Величина сжатия межплоскостных расстояний не превышает 10% и компенсируется увеличением более глубоких межплоскостных промежутков.

Реконструкция вызвана стремлением к системе обладающей минимальной поверхностной энергией. Поверхность полупроводника нестабильна из-за большого количества оборванных связей, их компенсация достигается в результате смещения верхних атомов. Дальнейшее уменьшение энергии происходит в следствии перераспределении электронов и образовании димеров.

Димер – это сложная молекула, состоящая из двух фрагментов простых.

Рассмотрим реконструкцию (7x7) для **Si(111)**, которая характеризуется сложной структурой. Адатомы занимают тетраэдрические положения на поверхности второго слоя и образуют локальную структуру (2x2). Двойной слой Si (111), включающий атомы второго и третьего слоев, состоит из треугольных подъячеек, ограниченных рядами димера, которые поочередно содержат и не содержат дефектов упаковки. В углах ячейки кольца из 12 атомов окружают угловые ямки. 36 из 12 атомов второго слоя связаны с адатомами и их химические связи не насыщены. Оставшиеся шесть атомов, у которых имеются ненасыщенные связи, называют рест-атомами.

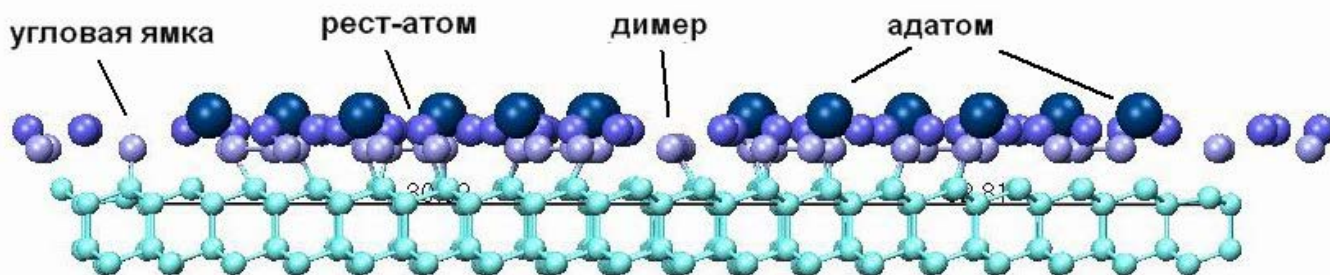


Рисунок 10.1 – Вид сверху и сбоку модели «димерной структуры атомов дефектов упаковки» поверхности Si(111)-(7x7). Адатома – темные кружки, атома более глубоких слоев – светлые кружки. Рест-атома с оборванными связями показаны синими кружками. Ячейка реконструкции выделена ромбом с ребром 30.7 Å

Реконструкция верхнего слоя обычно сопровождается в кремнии релаксации глубоких слоев.

11. Сложные поверхности монокристаллов. Обозначение ступенчатой поверхности

Кроме обычных поверхностных структур существуют сложные типы монокристаллической поверхности:

1. Высоко-индексные поверхности
2. Монокристаллические поверхности химических соединений.

Высоко-индексные – это поверхности, у которых один или несколько индексов Миллера ≥ 5 . Поверхности такого типа обычно расположены под малым углом относительно одной из низко-индексных плоскостей. В таком случае высоко-индексные поверхности могут рассматриваться как состоящая из террас, имеющих атомную упаковку идентичную низко-индексной поверхности и ступней одноатомной высоты, отделяющих одну низко-индексную поверхность от другой. Ступень также состоит из низко-индексных поверхностей. Реальные поверхности характеризуются нерегулярным множеством ступенек и вакансий.

Обозначение ступенчатой поверхности: $(S) - [@(hkl) + (hkl)]$.
Например:

$$(S) - [9(111) + (100)]$$

где, $9(111)$ – терраса с поверхностью (111) и протяжённостью девять атомов; (100) – шаги ступеньки.

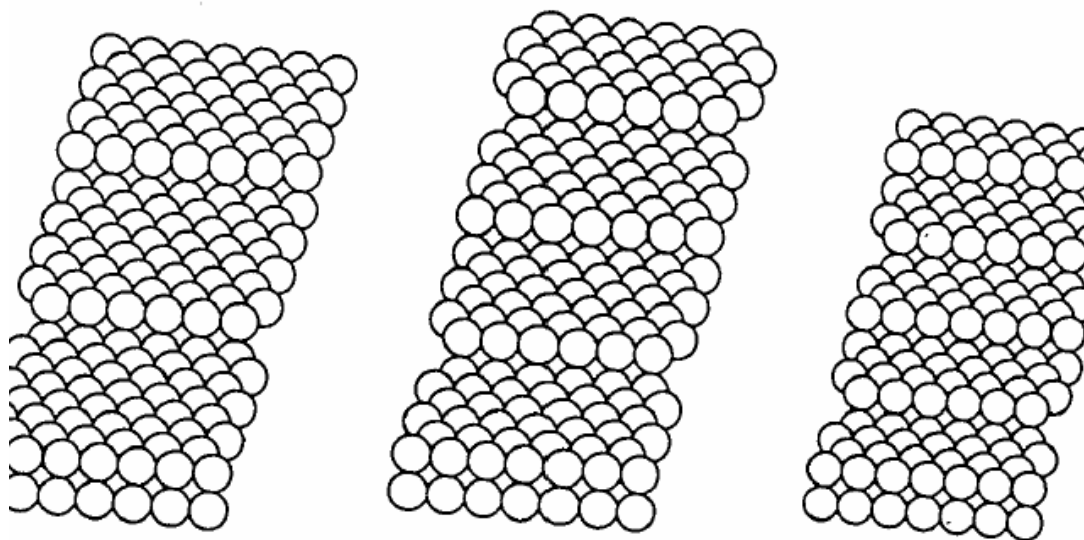


Рисунок 11.1 –Примеры высокоиндексных поверхностей

На высоко-индексных поверхностях преимущественные места адсорбции обычно наблюдаются на ступеньках. Кроме того, на высоко-индексных поверхностях интенсивно протекают процессы релаксации и реконструкции.

При моделировании поверхности химических соединений возникает вопрос: Если плоскость проходит через атом в элементарной ячейке, включается ли он в поверхность? В большинстве случаев принято включать атомы в состав поверхности, если их остается более 50%. Поверхности химических соединений,

например, Al_2O_3 , TiO_2 , имеют несколько типов поверхности преимущественно ограниченных либо атомами металла, либо кислородом.

Поверхности химических соединений могут иметь отклонения от объемности стехиометрии вследствие протекания локальных химических реакций, адсорбции молекул, поверхностной сегрегации химических элементов.

12. Неоднородные поверхности. Понятие физической, химической и индуцированной неоднородности

Для описания реальных поверхностей вводят понятие физической, химической и индуцированной неоднородности.

1. *Физическая неоднородность* включает в себя неровности поверхности различной природы и отклонение структуры поверхности от структуры идеального кристалла идентичной решетки Браве. Для описания физической неоднородности используют понятие дефектов и дислокаций: различают дефекты Френкеля (образованы дополнительные атомы), дефекты Шоттки (образованы недостающими атомами). Такие дефекты играют важную роль в процессах диффузии и электропроводности в твердых телах. Могут иметь место также дефекты упаковки, то есть объемные дефекты.

2. *Химическая неоднородность* - это дефект, обусловленный присутствием в структуре посторонних атомов вследствие поверхностной сегрегации. Даже в малых количествах такие атомы могут служить «активными центрами», определяющими процессы адсорбции и катализа. Необходимо учитывать, что проблема получения химически-однородной поверхности более сложная, чем проблема получения химически-чистых материалов в целом. Присутствие всего 10^{-6} объемного содержания примеси в 1 см^3 может создать примерно 20 монослоев атомов чужеродного вещества на поверхности.

3. *Индукцированная неоднородность* – это неоднородность, вызванная процессами адсорбции остаточных газов. Как известно из кинетической теории газов, поток молекул, попадающих на единицу поверхности за единицу времени определяется формулой $N = \frac{1}{4} n \bar{v}$. $\bar{v} = \sqrt{8 * RT / \pi \mu}$.

При остаточном давлении 10^{-4} Па и коэффициенте конденсации 1 адсорбированный слой атомов образуется в течение 1 секунды, при давлении 10^{-7} Па - для его образования нужно 1000 с:

$$10^{-4} \text{ Па} \rightarrow 1 \text{ с}$$

$$10^{-7} \text{ Па} \rightarrow 1000 \text{ с}$$

Адсорбированные слои играют большую роль в процессах взаимодействия между газом и твердым телом, а также существенно влияют на электрические, оптические и другие свойства поверхности твердых тел.

13. Кристалл Кёсселя. Величина энергии связи атомов в характерных положениях на поверхности.

В атомном масштабе поверхность реального кристалла никогда не бывает гладкой: на ней образуются ступеньки вследствие теплового движения атомов. Кристалл Кёсселя – модель, которая показывает наиболее характерные положения атомов, определяющие свойства дефектной поверхности простой кубической решетки. К ним относятся следующие положения:

1. На полностью заполненном крае;
2. В вершине угла;
3. На целиком заполненной поверхности;
4. На незаполненном крае;
5. В вершине незаполненного угла;
6. На ступеньке;
7. На поверхности;
8. Отсутствие атома (вакансия);
9. Полукристаллическое положение.

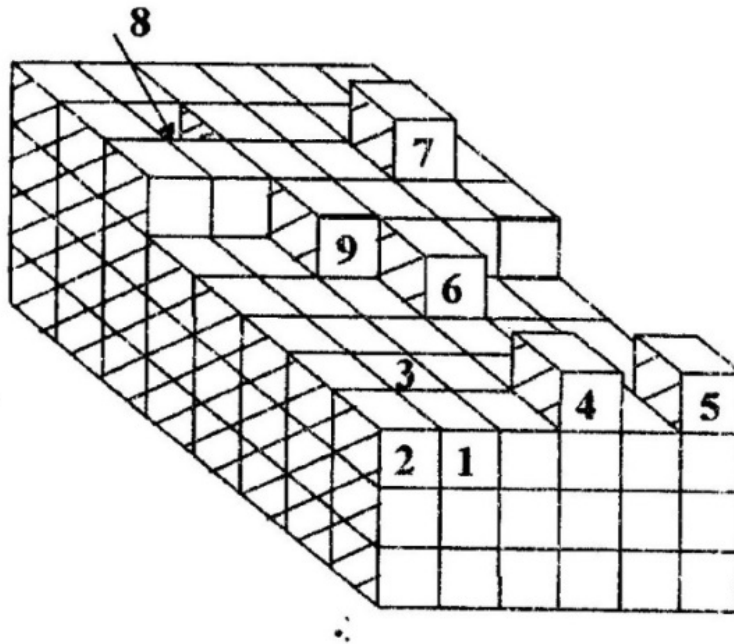


Рисунок 13.1 – Кристалл Кёсселя

Рассматривая структуру кристалла Кёсселя, очевидно, что силы, действующие на атом со стороны ближайших соседей, зависят от его положения на поверхности. Величина энергии связи в характерных положениях уменьшается в следующем порядке: $E_8 > E_3 > E_1 > E_9 > E_2 > E_6 > E_7 > E_4 > E_5$.

14. Доля поверхностей раздела и межзеренных границ в консолидированных наноматериалах. Особенности структуры.

К *консолидированным* наноматериалам относят компакты, пленки и покрытия из металлов, сплавов и соединений, получаемые методами порошковой технологии, интенсивной пластической деформации, контролируемой кристаллизации из аморфного состояния и разнообразными приемами нанесения пленок и покрытий.

Нанозерна (нанокристаллиты) этих материалов находятся не в изолированном (то есть в виде отдельных образований) или слабосвязанном (например, наночастицы с защитными полимерными оболочками) виде, а в консолидированном состоянии. Прочность межзеренных прослоек в консолидированных наноматериалах высока.

В целом для структуры наноматериалов характерно обилие поверхностей раздела: межзеренных границ и тройных стыков — линий встречи трех зерен (рис.14.1).

Область межзеренной границы шириной от нескольких десятков до нескольких сотен атомных слоев отличается от объема зерна по структуре и составу. Часто межзеренная граница рассматривается как область взаимного проникновения кристаллических решеток соседствующих зерен (чередование участков бездефектного упругого сопряжения решеток и дислокаций несоответствия). Межфазные границы, например, граница между подложкой и эпитаксиальной пленкой, также могут быть описаны в терминах межзеренных границ.

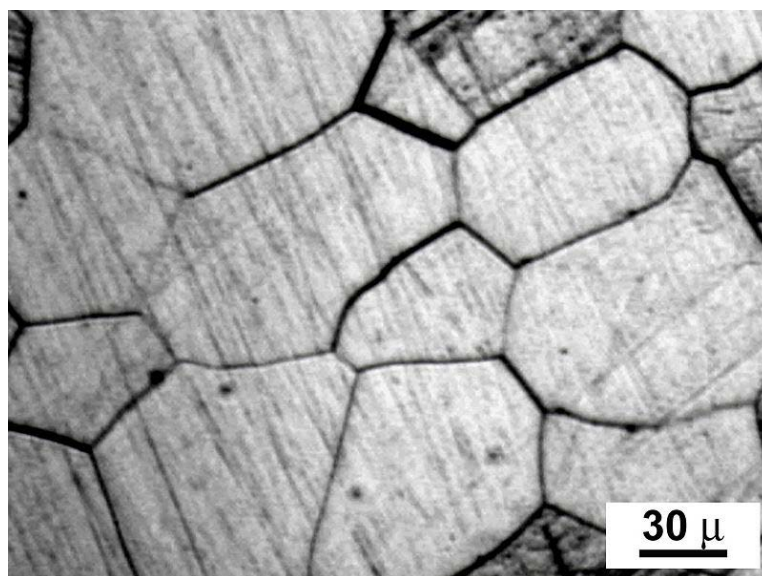


Рисунок 14.1 – Пример структуры материала

15. Влияние размера зерна на общую долю поверхностей раздела, долю межзеренных границ и тройных стыков

Межзёрная граница — поверхность раздела двух зёрен (кристаллитов) в поликристаллическом материале. Межзёрная граница является дефектом кристаллической структуры и имеет тенденцию к понижению электрической проводимости и температуропроводности. Высокая энергия границ и относительно слабая связь в большинстве межзёрнных границ часто делает их предпочтительным местом для возникновения коррозии и выделения второй фазы.

Многие физические свойства твёрдого тела (электрические, механические, магнитные) зависят от числа и строения межзёрнных границ. Вблизи таких границ большинство физических процессов (главным образом, связанных с появлением или исчезновением дефектов в твёрдом теле) протекает иначе, чем в объеме зерен; как правило, облегчены выделение новых фаз, зарождение и развитие трещин, процессы диффузионного массопереноса и т. д. Подвижность межзёрнных границ определяет кинетику рекристаллизации и фазовых превращений в гетерофазных структурах.

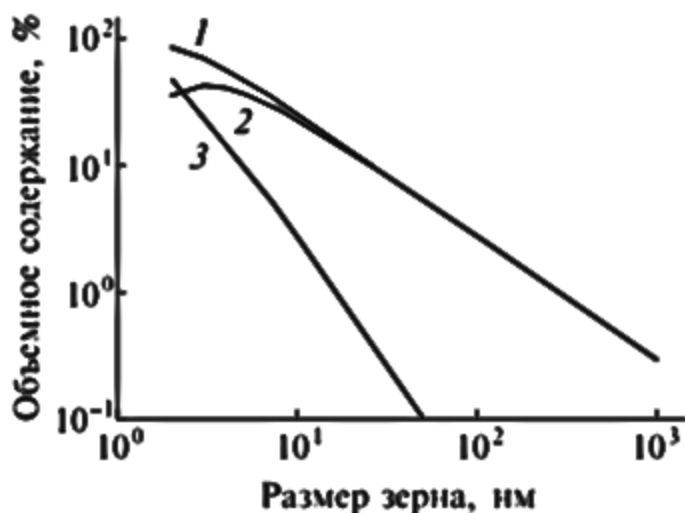


Рисунок 15.1 - Влияние размера зерна на общую долю поверхностей раздела (1), долю межзеренных границ (2) и тройных стыков (3) при $s = 1$ нм

График построен на основании простых геометрических соображений. Так, общая доля поверхностей раздела составляет

$$V_{\text{п.р.}} = 1 - \left[\frac{L - s}{L} \right]^3 \sim 3s/L$$

Доля собственно межзёрнных границ

$$V_{\text{м.г.}} = [3s(L - s)^2]/L^3$$

и соответственно доля тройных стыков

$$V_{\text{т.с.}} = V_{\text{п.р.}} - V_{\text{м.г.}}$$

Здесь L – размер зерна; s – ширина границы (приграничной зоны).

Из данных рис. 15.1 следует, что существенная доля поверхностей раздела (несколько процентов) отвечает размеру зёрен $L < 100$ нм; при $L \leq 10$ нм доля $V_{п.р.}$ составляет уже несколько десятков процентов, причём в этом интервале значений L доля тройных стыков стремительно растёт. Доля поверхностей раздела в общем объеме материала приблизительно равна $3s/L$, где при $s \approx 1$ нм доля $V_{п.р.} = 50\%$ достигается при $L \approx 6$ нм.

Таким образом, если твёрдое тело состоит из кристаллитов размером несколько нанометров (< 10 нм), то доля поверхностей раздела или доля областей с разупорядоченной структурой весьма велика.

Для пленок (в том числе столбчатых и многослойных) нужно принимать во внимание не только их общую толщину, но и диаметр столбов и толщину отдельных слоев, а также наличие нанозерен внутри пленок, столбов и слоев.

16. Виды и механизмы диффузии. Поверхностная диффузия

Диффузия в кристалле - перенос частиц в кристаллическом твердом теле обусловленный хаотическим тепловым движением. Диффундировать могут собственные атомы решётки (самодиффузия/гомодиффузия), атомы или ионы других химических элементов (гетеродиффузия/примесная диффузия) и точечные дефекты структуры кристалла, а именно междоузельные атомы и вакансии. Основные механизмы:

1. Вакансионный
2. Междоузельный
3. Прямой обмен атомов местами - заключается в том, что два соседних атома обмениваются местами.

Если в кристалле имеются протяженные дефекты (дислокации) скорость диффузии по ним может быть существенно выше, чем в бездефектной области.

Зернограничная диффузия - диффузия в твердых поликристаллических телах, сосредоточенная в узких, толщиной в несколько атомных слоёв, зонах на границе зёрен с различной кристаллографической ориентацией.

Благодаря высокой концентрации дефектов диффузия по границам зёрен протекает значительно быстрее, чем в объёме зёрен, где концентрация дефектов ниже. Данная диффузия является одним из механизмов низкотемпературного спекания в производстве керамики (увеличение дисперсности исходных материалов вызывает снижение температуры спекания). Зернограничная диффузия является одним из механизмов деформации твердых тел.

Поверхностная диффузия – процесс, связанный с перемещением частиц на поверхности твердого тела в пределах первого поверхностного слоя либо по верхнему. Диффундировать могут атомы самого твердого тела и адсорбированные частицы. При наличии градиента концентрации случайное блуждание большого числа частиц приводит к их усредненному диффузионному движению в направлении противоположному градиенту. На процесс влияет взаимодействие между частицами, присутствие дефектов и т.д. Данная диффузия играет определяющую роль в процессах роста тонких пленок и эпитаксии (ориентировочное наращивание).

17. Объемная диффузия вблизи поверхности. Основные уравнения

На поверхности атомы адсорбированные твердым телом могут находиться в двух позициях (рисунок а):

1. В адсорбционном положении;
2. В седловой точке.

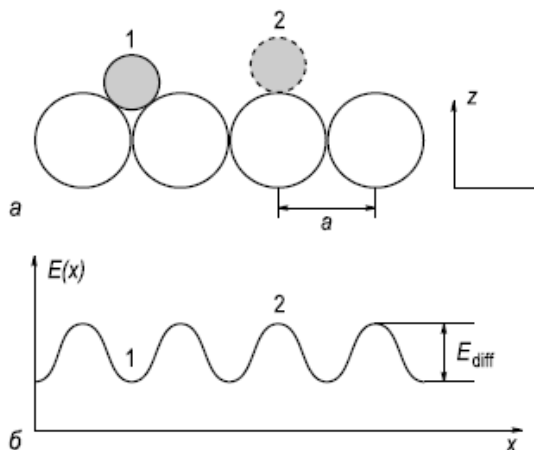


Рисунок 17.1 – Адсорбированные атомы находящиеся в а) адсорбционном положении б) в седловой точке

На рисунке Б приведена средняя схематическая диаграмма зависимости энергии от положения атома вдоль поверхности. Из данной диаграммы следует что минимальной энергией обладает атом находящийся в адсорбционном положении, максимальной в седловой. Разница данных энергий соответствует энергии диффузии.

На рисунке В приведена зависимость потенциальной энергии адсорбированного атома относительно z , т.е. расстояния от поверхности

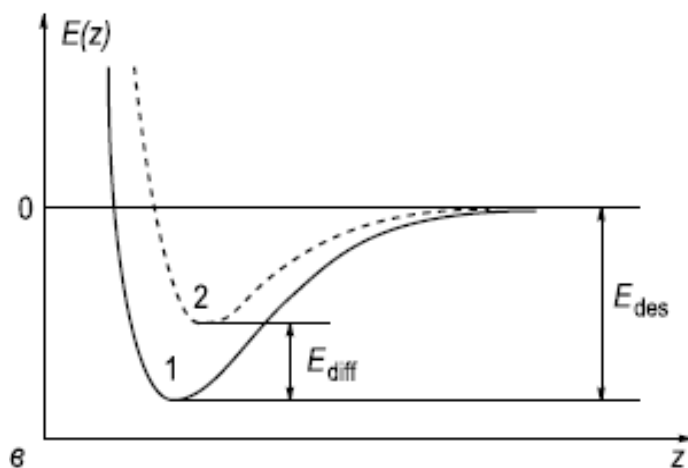


Рисунок 17.2- Зависимость потенциальной энергии адсорбированного атома относительно z

18. Диффузия по поверхности отдельного атома и химическая диффузия

Диффузия отдельного атома. В идеальном случае коэффициент диффузии отдельного атома относится к движению единственного атома по поверхности, чей путь или «след» он описывает.

Среднеквадратичное смещение атома за время t равно:

$$\langle \Delta r^2 \rangle = \nu a^2 t,$$

где a - длина перескока (то есть расстояние между адсорбционными местами), ν - частота скачков, z - число соседних положений, куда может перескочить атом.

Этот коэффициент диффузии дается выражением:

$$D = \frac{\langle \Delta r^2 \rangle}{zt} = \frac{\nu a^2}{z}$$

Химическая диффузия. Для случаев, когда взаимодействие между диффундирующими частицами становится существенным, первый закон Фика следует записать в более общей форме:

$$J = -L \frac{\partial \mu}{\partial x},$$

где μ - химический потенциал диффундирующих частиц, а множитель L называют *коэффициентом переноса*.

Диффузия массопереноса.

Коэффициент диффузии массопереноса D_M формально связан с коэффициентом собственной диффузии D_I соотношением:

$$D_M = \frac{n}{n_0} D_I,$$

где n - действительное число подвижных частиц, а n_0 - их максимальное число.

Для равновесной концентрации адатомов можно написать:

$$n_A = n_0 \exp\left(-\frac{\Delta G_A}{k_B T}\right),$$

где ΔG_A - энергия формирования адатома.

$$D_M = \frac{\nu_0 a^2}{z} \exp\left(-\frac{\Delta G_A + E_{diff}}{k_B T}\right).$$

19. Поверхностная диффузия кластеров. Коллективный и индивидуальный механизмы

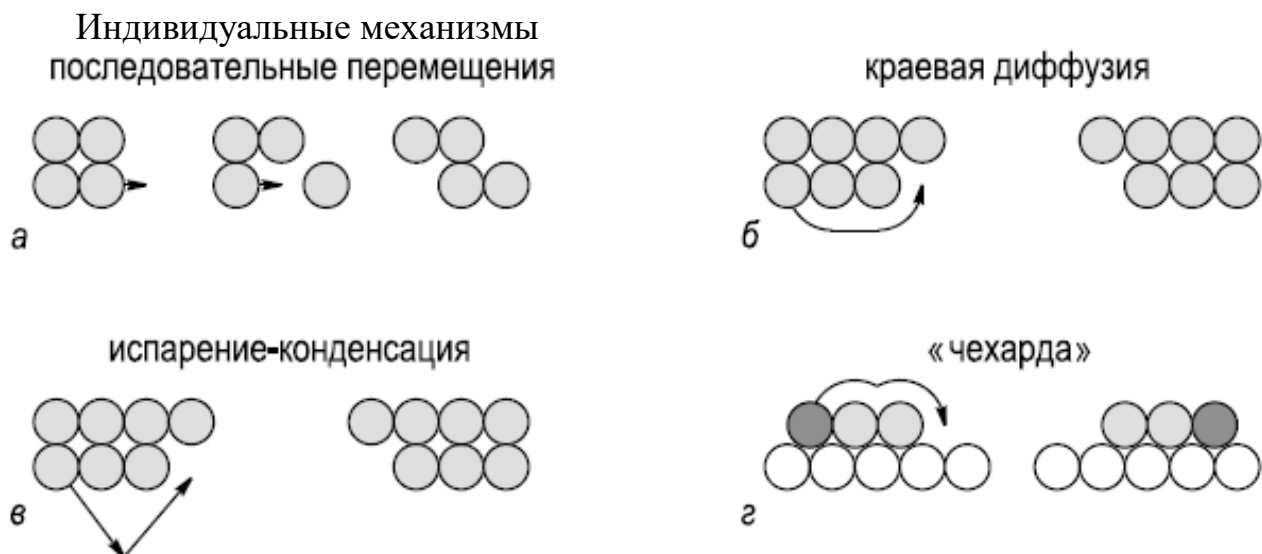


Рисунок 19.1 - Индивидуальные механизмы движения кластеров, то есть механизмы, в которых кластер перемещается как целое за счет независимого движения атомов, составляющих кластер: а - механизм последовательных перемещений; б - механизм краевой диффузии; в - механизм испарения-конденсации; г - механизм «чехарды». На рис. а, б и в показан вид сверху, а на рис. г вид сбоку

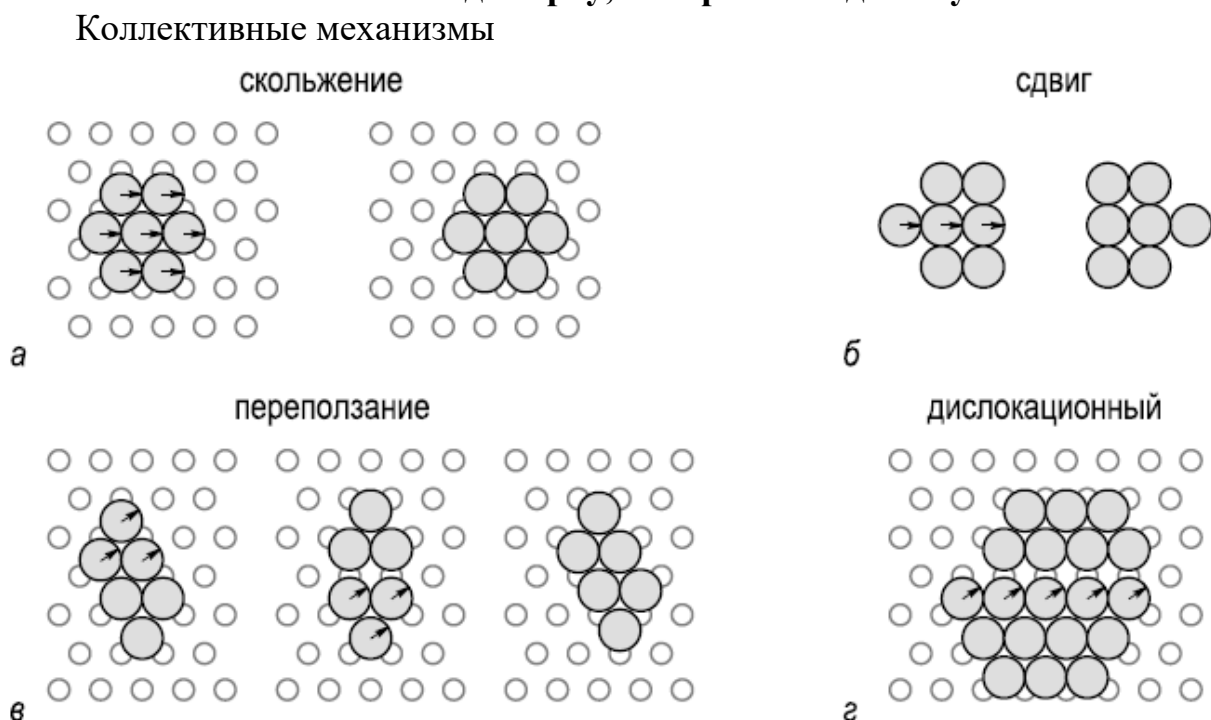


Рисунок 19.2 - Согласованные коллективные механизмы движения кластеров: а - механизм скольжения; б — механизм сдвига; в — механизм переползания; г — дислокационный механизм

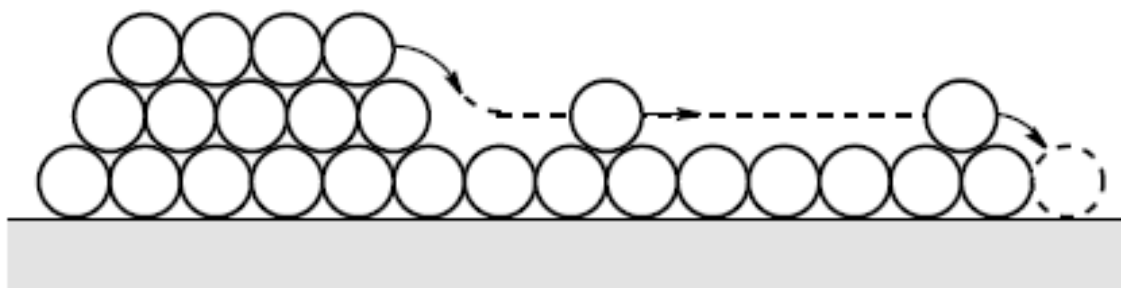


Рисунок 19.3 - Механизм раскатывающегося ковра, иллюстрирующий диффузию адсорбата, сопровождающуюся формированием поверхностной фазы. Подвижные адатомы (представленные «атомами второго слоя») движутся по поверхностной фазе (представленной прочно связанными «атомами первого слоя») для того, чтобы встроиться в ее край

20. Поверхностная структура металлов. Взаимодействие частиц с поверхностью подложки

Макроскопические монокристаллы металлов в технологии не используются. Все металлические изделия, плёнки являются поликристаллическими, причём размер кристаллов зависит от способа получения, а также механической и тепловой обработки материала. Но свойства поликристаллических поверхностей металлов определяются поверхностями индивидуальных кристаллитов. Возникновение и число различных поверхностей кристаллов зависит от их относительной термодинамической стабильности (анализ поверхности ГЦК следует, что кристаллит ограничивается атомными плоскостями (111)).

В случае наночастиц металлов, где их средний размер составляет десятки нанометров, эти частицы представляют собой монокристалл.

Форма частиц нанокристаллов определяется величиной вкладов в полную энергию системы свободной энергии поверхности. Уменьшить поверхностную энергию при постоянном отношении m/V можно двумя способами:

1. Снижением площади поверхности;
2. Формированием поверхности с низкой поверхностной энергией.

Для изотропных веществ, вещество стремится принять форму шара, но твёрдое тело обладает кристаллической решёткой.

С точки зрения энергетики поверхности, например, ГЦК – металл ограничивается плоскостями (111), следовательно, кристаллическая частица должна иметь форму октаэдра, которая состоит из восьми симметрично связанных плоскостей.

Компромисс между образованием низкоэнергетических поверхностей и минимальной их площади достигается усечённой вершиной октаэдра. В результате чего, частицы имеют восемь поверхностей (111) и шесть (100). В результате достигается минимальное отношение массы поверхности к объёму, учитывая наличие кристаллической решётки.

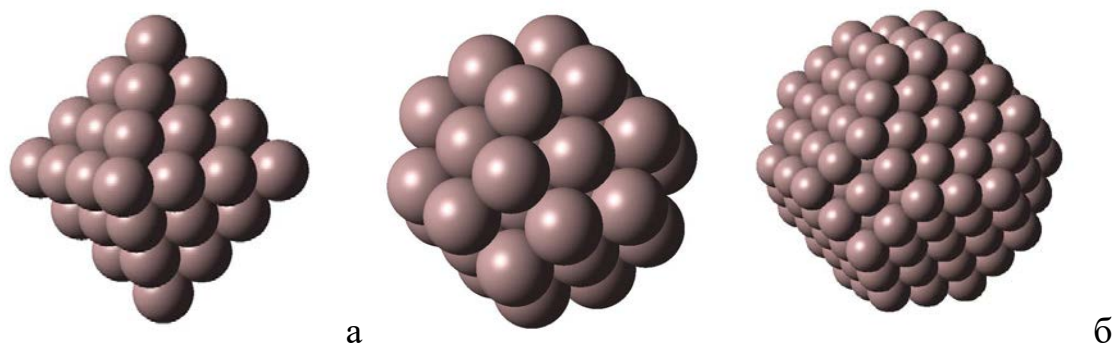


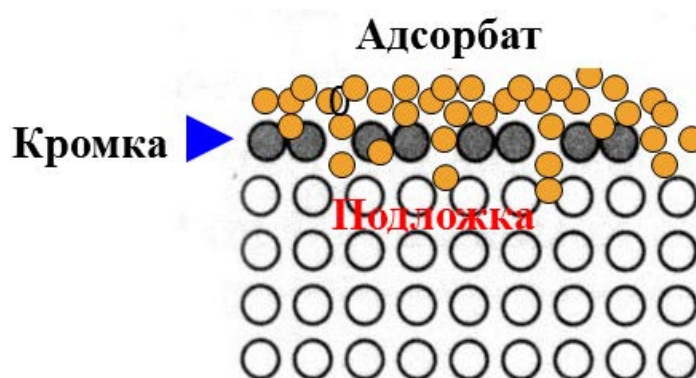
Рисунок 20.1 - Октаэдр (а) и кубо-октаэдр (б)

Если частицы металла слабо взаимодействуют с поверхностью подложки, её геометрическая форма и структура поверхности не изменяется. При сильном

взаимодействии происходит повышение площади контакта с металлом и значительное изменение формы и структуры. В этом случае необходимо учитывать поверхностную энергию подложки.

21. Понятие адсорбат, кромка и суперструктура. Запись структуры поверхности. Матричная запись

Область твердого тела вблизи поверхности называют кромкой. Таким образом, «поверхность» представляется в виде подложки (трехмерно-периодическая структура объема) и нескольких атомных слоев кромки. Реальная поверхность всегда содержит адсорбат. Для описания слоев поверхности над кромкой используется понятие структура адсорбата, подразумевающее наличие локализованного избытка посторонних частиц, поступивших либо из внешней по отношению к твердому телу среды, либо из самого твердого тела в результате диффузии.



– Структура верхнего атомного слоя

Для обозначения специфической структуры верхних атомных слоев используется также термин суперструктура.

Если поверхностные слои твердого тела представляют собой перестроенную кромку, либо адсорбат, либо и то и другое, то структура в таких слоях может быть неупорядоченной или упорядоченной, но во всех случаях когерентной с подложкой; либо упорядоченной, но некогерентной с подложкой в случае, когда адсорбат имеет свою структуру.

Запись для описания суперструктуры связывает ее двумерную решетку с решеткой идеальной плоскости подложки. Обычно это делается с помощью одного из двух способов:

1. Матричная запись или Парка и Маддена (Park, Madden);
2. Запись Вуда.

Матричная запись заключается в определении матрицы, которая

у
с
т
а
н
а
г
д
в
а
е

$$\mathbf{a}' = G_{11}\mathbf{a} + G_{12}\mathbf{b},$$

$$\mathbf{b}' = G_{21}\mathbf{a} + G_{22}\mathbf{b},$$

$$G = \begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{pmatrix}$$

G_{ij} – четыре коэффициента, образующих матрицу:

Используя матрицу G , систему можно записать:

$$\begin{pmatrix} a' \\ b' \end{pmatrix} = G \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}$$

22. Запись структуры поверхности. Запись Вуда

Запись Вуда имеет свои особенности:

1. менее универсальная;
2. указывает: а) соотношение длин векторов примитивных трансляций суперструктуры и плоскости подложки и б) угол на который следует повернуть элементарную ячейку поверхности, чтобы ее оси совместились с векторами примитивных трансляций подложки.

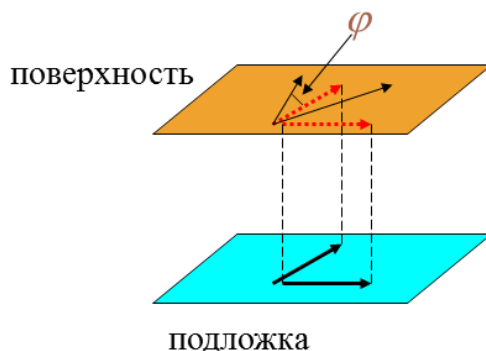


Рисунок 22.1-Поверхность и подложка

Если адсорбат А на поверхности $\{hkl\}$ материала X образует структуру с базисными векторами трансляции длиной $|a| = p|a|$ и $b' = q|b|$ и углом φ

П
о
в
о
р
о
Где А – хим. символ адсорбата.

$$X\{hkl\}p \times q - R \varphi - A$$

или

$$X\{hkl\}(p \times q)R \varphi - A.$$

Эти обозначения можно использовать только тогда, когда углы поворота базисных векторов элементарных ячеек поверхности и подложки одинаковы (равны по величине). Следовательно, такие обозначения пригодны для систем, в которых ячейки поверхности и подложки имеют одну и ту же решетку Браве или в которых одна из решеток прямоугольная, а другая квадратная.

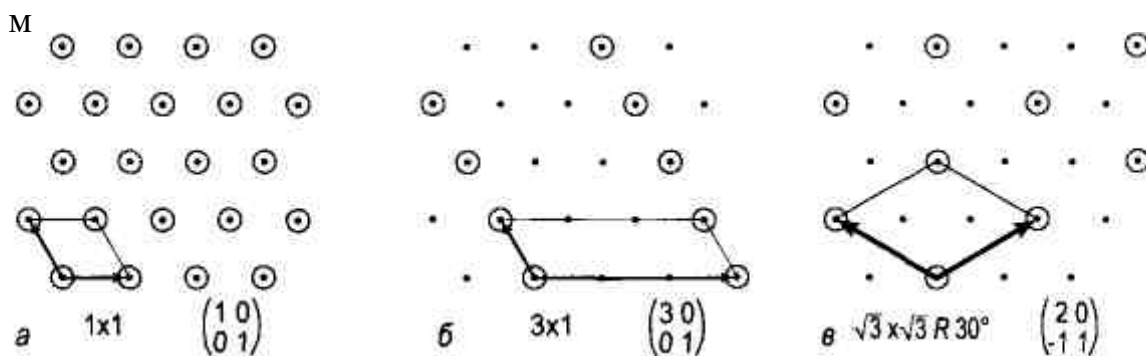


Рисунок 22.2-Различные примеры записи Вуда

Примеры записи Вуда и матричной записи для некоторых суперрешеток на гексагональной двумерной решетке: узлы двумерной решетки подложки

е
й
к
и

показаны черными точками, узлы решетки суперструктуры - белыми кружками.

С
У
п
е
р
р
е
п
е
т
к
а
х

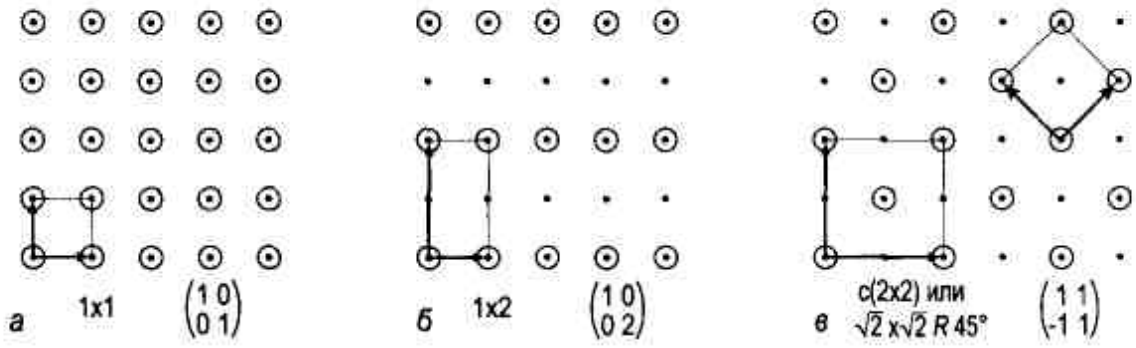


Рисунок 22.1. Примеры записи Вудса и матричной записи для некоторых примитивных суперрешеток на квадратной двумерной решетке

а Когда элементарная ячейка суперструктуры имеет тот же размер и ту же ориентацию, что и элементарная ячейка подложки, то есть обе решетки совпадают то такая суперструктура описывается:

и
ч
н
о

$$1 \times 1 \text{ или } \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

й Если элементарная ячейка суперструктуры в 3 раза длиннее ячейки подложки вдоль одной оси и имеет ту же длину вдоль другой оси, то запись для этой суперструктуры будет:

а
п
и
с
и

$$3 \times 1 \text{ или } \begin{pmatrix} 3 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Аналогичный случай представляет собой суперрешетка

э
т
а

$$1 \times 2 \text{ или } \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}$$

с
у
п
е
р
р
е
ш
е
т
к
а

23. Электронная структура поверхности. Таммовские состояния и состояния Шокли

Таммовские состояния. Если кристалл ограничен поверхностью, то периодичность решетки нарушается (по крайней мере в направлении, перпендикулярном к поверхности). При этом оказываются разрешенными и такие значения энергии, которые попадают в запрещенные зоны. Это и есть таммовские поверхностные уровни. Электрон в таммовском состоянии напоминает поплавок на поверхности воды: он может свободно двигаться вдоль поверхности, но не способен ни уйти в глубь твердого тела, ни выйти из тела наружу. Такое поведение электронов в поверхностных состояниях описывается волновой функцией (жирная кривая), экспоненциально спадающей в глубь кристалла. Пунктирная кривая изображает потенциальную энергию электрона в кристалле. Из хода этой кривой видно, что для того, чтобы оказаться в вакууме, электрону необходимо преодолеть потенциальный барьер. Для простоты на рисунке 23.1 не показан изгиб зон вблизи поверхности.

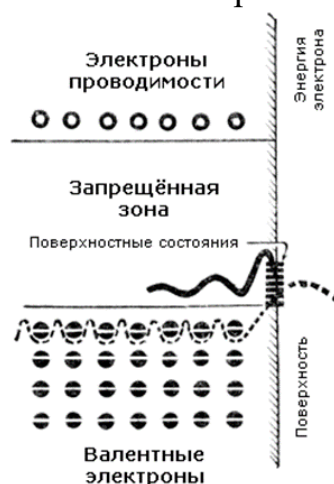


Рисунок 23.1 – Таммовские состояния

Состояния Шокли. Поверхностные состояния Шокли можно объяснить неспаренными связями атомов, находящихся на поверхности. Например, при расколе кристалла создававшие эти связи электронные пары распадаются на независимые электроны, каждый из которых остается в своем атоме. Энергии «одиноких» электронов больше, чем у электронов, образующих ковалентные связи, и поэтому могут попасть в одну из запрещенных зон. Но такие энергии, как мы видели, соответствуют таммовским состояниям. Этот пример показывает, что таммовские состояния и поверхностные состояния Шокли – два частных случая одного и того же явления: перестройки электронной структуры кристалла поверхностью. Таммовские состояния отвечают такой модели кристалла, когда электронные волны проходят через него, лишь слегка «цепляясь» за атомы, почти как в пустом пространстве. В противоположность этой модели «квазисвободных» электронов, состояния Шокли соответствуют сильной связи с атомами, когда зонное движение электронов по кристаллу возникает лишь благодаря их перескокам с одной связи на другую.

24. Поверхностная проводимость. Четырехзондовый метод измерения поверхностного сопротивления.

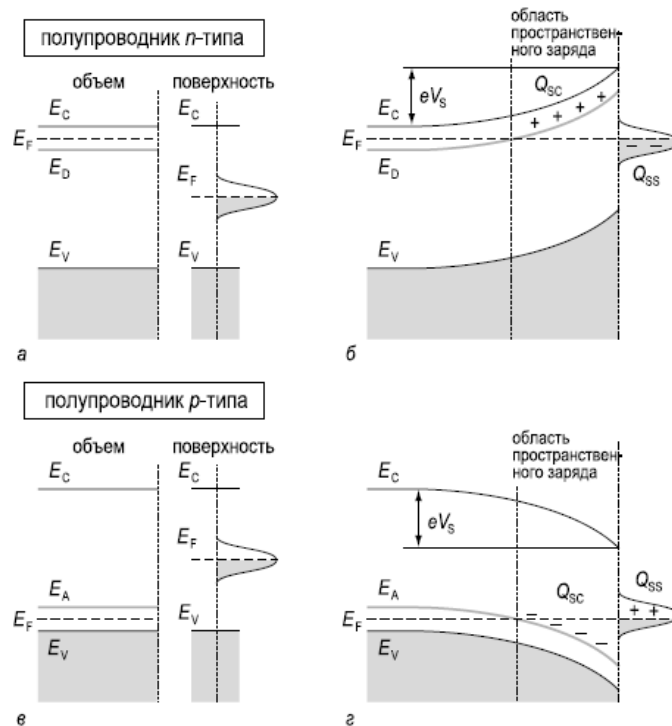


Рисунок 24.1 - Схематическая иллюстрация изгиба зон у поверхности полупроводника

Где а, б - n-типа; в, г - p-типа. Рис. а и в иллюстрируют неравновесную ситуацию. Рис. б и г показывают изгиб зон при равновесии. E_C и E_V — края зоны проводимости и валентной зоны, E_F — энергия Ферми, E_D и E_A - энергии объемных донорных и акцепторных уровней. $Q_{SS} = -Q_{SC}$ - заряды, накопленные на поверхности и в слое пространственного заряда. $eV_s = eV(z=0)$ обозначает изгиб зон.

Схема измерения сопротивления четырехзондовым методом представлена на рис. 24.2. На плоской поверхности образца вдоль прямой линии размещены четыре металлических зонда с малой площадью соприкосновения. Расстояния между зондами s_1 , s_2 и s_3 . Через внешние зонды 1 и 4 пропускают электрический ток I_{14} , на внутренних зондах 2 и 3 измеряют разность потенциалов U_{23} . По измеренным значениям I_{14} и U_{23} можно определить удельное сопротивление полупроводника.

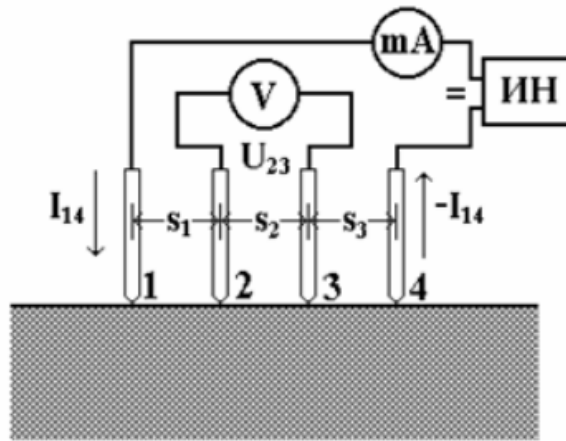


Рисунок 24.2 – Схема 4-х зондового метода измерения сопротивления

Если расстояния между зондами одинаковы, то удельное сопротивление определяется формулой:

$$\rho = 2\pi s \frac{U_{23}}{I_{14}} .$$

25. Сопротивление как функция расстояния между зондами. Профили сопротивления

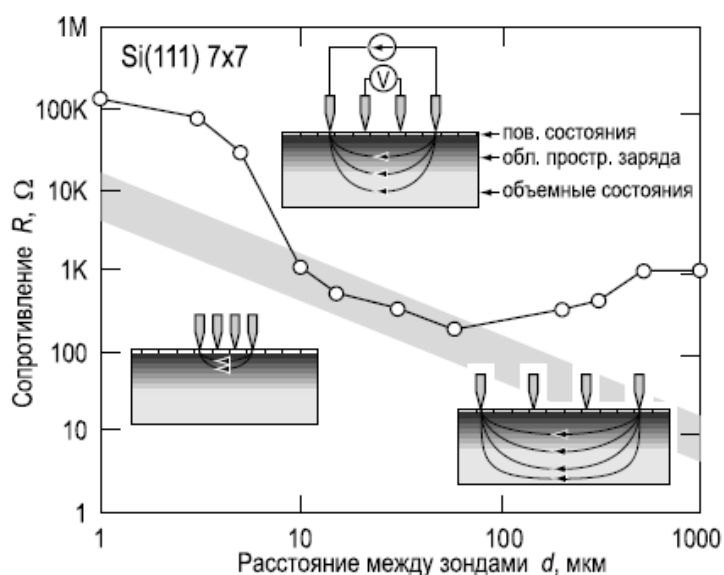


Рисунок 25.1 – Зависимость сопротивления от расстояния между зондами

Сопротивление образца Si(111), измеренное четырехзондовым методом, как функция расстояния между зондами. Вставки схематически показывают распределение тока в образце при использовании четырехзондового метода при различных расстояниях между зондами. Серой сплошной полосой показана расчетная зависимость для полубесконечного образца $R = \rho/2\pi d$ с удельным сопротивлением $\rho = 5 - 15 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

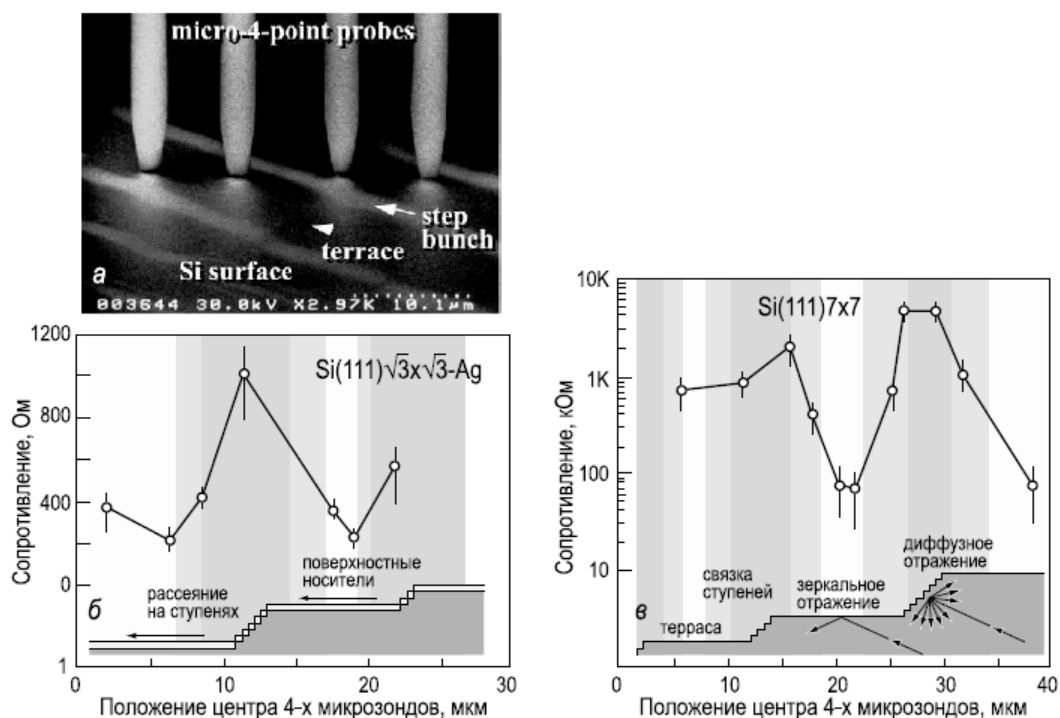


Рисунок 25.2 – СЭМ изображение микрозондов в контакте с поверхностью (а) и профили сопротивления Si(111)31/2x31/2-Ag (б) и Si(111)7x7 (в)

СЭМ изображение микрозондов в контакте с поверхностью показаны на рисунке 25.2, а. Более яркие полосы на поверхности образца соответствуют макроступеням, более широкие темные полосы террасам.

Морфология поверхности образцов изображена схематически в нижней части графиков. Сопротивление, измеренное поперек ступени, намного выше, чем измеренное на террасе без ступеней.

26. Модель ТСИ. Энергия образования адатома и вакансии.

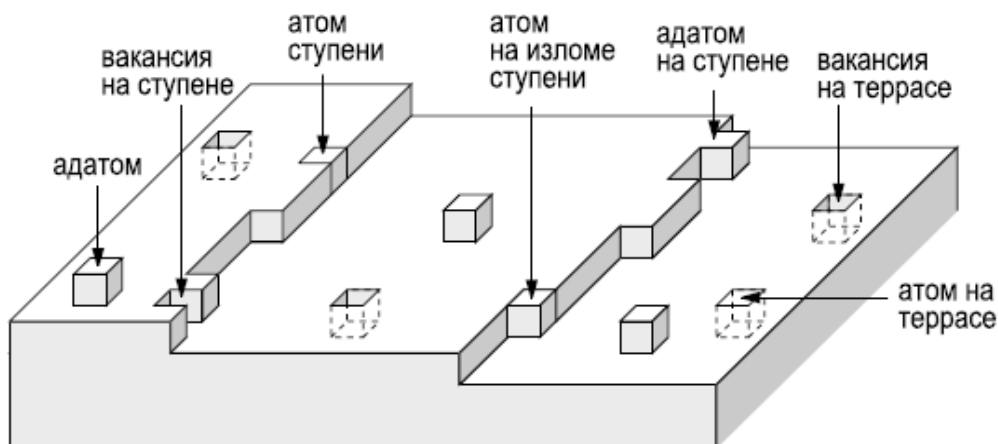


Рисунок 26.1 - Модель ТСИ, показывающая типичные атомные положения и дефекты на поверхности (100) простого кубического кристалла

Положения атомов в кристалле и их энергия в простой кубической решетке:

Положение	Энергия	Число соседей		
		1-х	2-х	3-х
Адатом	ε_A	1	4	4
Адатом на ступени	ε_{LA}	2	6	4
Атом в изломе ступени	ε_K	3	6	4
Атом на ступени	ε_L	4	6	4
Атом на террасе	ε_T	5	8	4
Атом в объеме	ε_B	6	12	8

Энергия образования адатома может быть записана как

$$\Delta G_A = \varepsilon_A - \varepsilon_K$$

где ε_A и ε_K - это энергии связи атома в положениях излома и адатома, соответственно.

Равновесная концентрация адатомов (n_A) при температуре $T > 0$ дается выражением

$$n_A = n_0 - \exp - \frac{\Delta G_A}{k_B T},$$

где n_0 - это полное число положений атома на единицу площади.

Формирование вакансии на поверхности может быть представлено как удаления атома поверхности (разрыв пяти связей) и помещение его в излом на ступени (образование трех связей).

$$\Delta G_V = \varepsilon_K - \varepsilon_T$$

$$n_V = n_0 - \exp - \frac{\Delta G_V}{k_B T}$$

27. Выходы на поверхность краевых и винтовых дислокаций. Сингулярные и вицинальные поверхности. Формирование пирамид роста

Сингулярной называют поверхность, не содержащую физических неоднородностей, т.е. атомарно-гладкая.

Атомарно-гладкую поверхность получить ещё более сложно, чем атомарно-чистую. Большинство атомарно-чистых поверхностей являются вицинальными – имеют террасы, ступени, изломы, адатомы, вакансии, линейные дефекты.

Вицинальные поверхности бывают: разориентированные в одном направлении, разориентированные в двух направлениях.

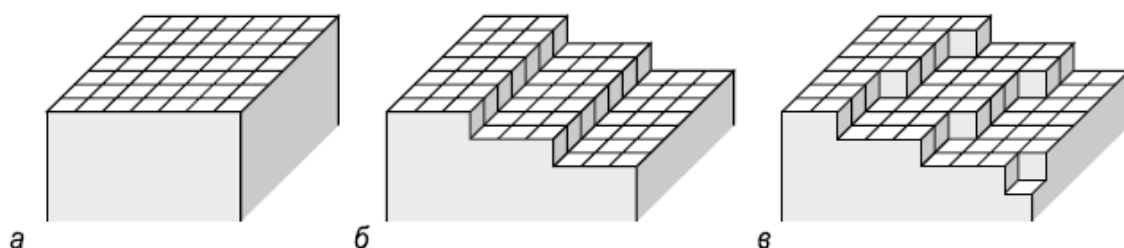


Рисунок 27.1 - ТСИ модель: а - сингулярной поверхности (100) и вицинальных поверхностей, разориентированных по отношению к поверхности (100) в б - одном; в - двух направлениях

Кроме точечных дефектов, поверхность может содержать линейные и объёмные. Линейные дефекты – краевые и винтовые дислокации. В начале объёмных дефектов поверхности, чаще всего в монокристаллах встречаются пирамиды роста, которые при определённых условиях могут формировать вокруг точек выхода винтовые дислокации.

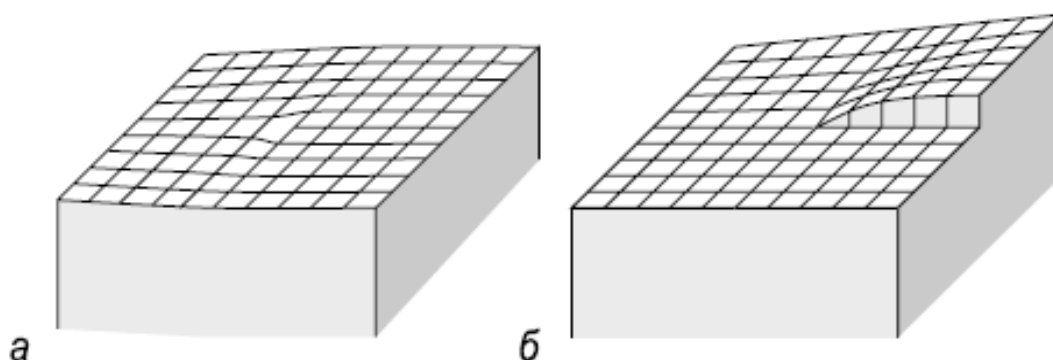


Рисунок 27.2 - Выход - а - краевой дислокации; б - винтовой дислокации на поверхность (100) модельного ТСИ кристалла

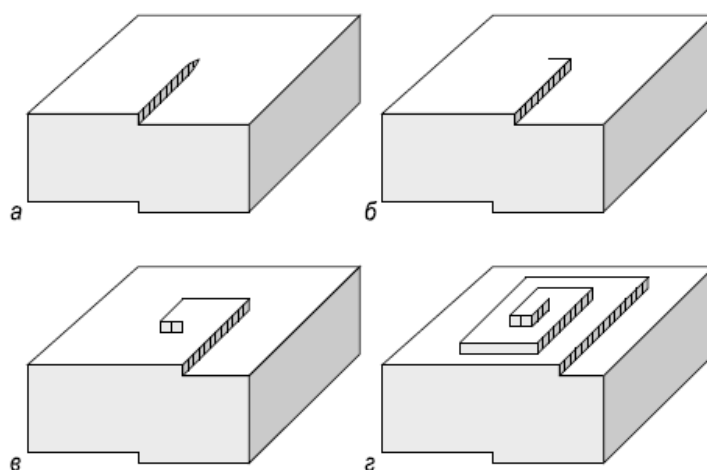


Рисунок 27.3 - Схематическая диаграмма, иллюстрирующая последовательные стадии от (а) к (г) формирования пирамиды роста вокруг точки выхода винтовой дислокации

28. Влияние поверхности на работу полупроводниковых приборов

Состояние поверхности полупроводника и границ раздела важны как для процесса изготовления полупроводниковых приборов, так и для его последующей работы с необходимыми характеристиками. Отрицательное влияние поверхностных явлений на работу диодов, транзисторов и фотоэлектрических приборов связано с поверхностной рекомбинацией (процессом исчезновения носителей заряда – электронов и дырок). Поверхностная рекомбинация вызывает уменьшение КПД фотоэлемента, уменьшение коэффициента усиления транзистора, увеличение обратного тока р-п перехода.

Надёжность работы полупроводниковых приборов зависит от величины и стабильности поверхностного потенциала полупроводника, поскольку он определяет концентрацию носителей заряда в приповерхностной области. Данный потенциал определяется зарядом на поверхностных электронных состояниях и зарядом инжектированным в диэлектрические системы диэлектрика.

Таким образом, нужно знать параметры этих состояний и уметь управлять ими, т.е. стабилизировать их свойства в случае воздействия температуры полей и излучения. Эта сложная задача ещё не до конца решённая системой $Si - SiO_2$.

Если поверхность прибора не защитить от примеси, которая всегда есть в атмосфере и материале корпуса, то атомы этих примесей будут захватываться на уровнях поверхностных состояний, изменяя их заряд и другие характеристики. Это приведёт к изменению поверхностного потенциала и в итоге к изменению параметров прибора и его возможному выходу из строя. Поэтому в технологии микроэлектроники всегда применяют пассивацию (защиту) поверхности полупроводниковых приборов.

Для полупроводников, поверхность является стоком для примеси и дефектов. Они скапливаются на ней, диффундируя из объема. Уровень легирования на поверхности отличается от уровня легирования объема.

Современные методы анализа поверхности позволяет изучать эти процессы и в определённой степени управлять ими.

29. Фасетированные поверхности

Фасетирование поверхности представляют собой образование микроскопические упорядоченных «холмов» и «канавок» на поверхности, которые имеют определённый период повторения D (рисунок 29.1).

На поверхности образуется система наклонных к исходной поверхности кристаллических граней.

Причиной спонтанного фасетирования является зависимость свободной энергии поверхности от её ориентации относительно кристаллографических осей. Если плоская поверхность имеет большую удельную поверхностную энергию, она спонтанно трансформируется в такую систему плоскости, которая имеет меньшую удельную поверхностную энергию. Это уменьшает полную свободную энергию, несмотря на увеличение её полной площади.

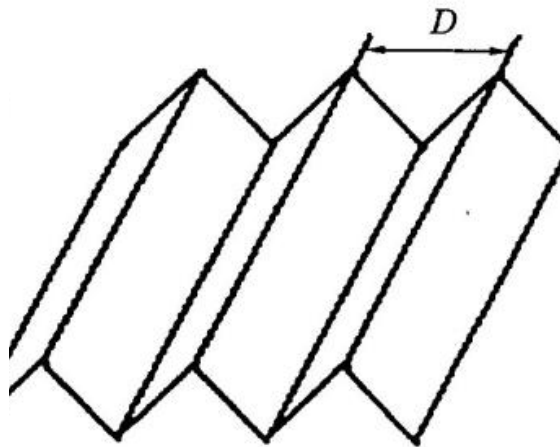


Рисунок 29.1 – Фасетированная поверхность

Полная свободная энергия периодически фасетированной поверхности в расчёте на единицу площади имеет вид:

$$E = E_{\text{реб}} + E_{\text{пов}} + \Delta E_{\text{упр}},$$

где $E_{\text{реб}}$ – энергия ребер, $E_{\text{пов}}$ – энергия наклонных граней, $\Delta E_{\text{упр}}$ – изменение упругой энергии релаксации, которая возникает в результате образования ребер.

$$\Delta E_{\text{упр}} = -\frac{C}{D} \ln \frac{D}{a},$$

где a – постоянная решётки; D – коэффициент фасетирования (const).

Фасетированные структуры наблюдаются на поверхностях с большими индексами Миллера ($GaAs$ – (775)).

Периодичность фасетированных поверхностей дают возможность получения квантовых проволок и точек.

Как показывает анализ возможных режимов роста, тип растущей структуры определяется тем, смачивается ли осаждаемый материал подложки или нет. Возможны следующие варианты структур:

1. Если материал смачивает подложку, образуется однородное покрытие (рисунок 29.1, а);

2. Если материал не смачивает подложку, изолированные кластеры образуются в канавках на фасетированной поверхности (рисунок 29.1, b,c) ;

3. При большой толщине покрытия, холмы на поверхности осаждаемого материала, образуются над канавками подложки. В результате возникает непрерывный слой с модуляцией толщины (рисунок 29.1, d).

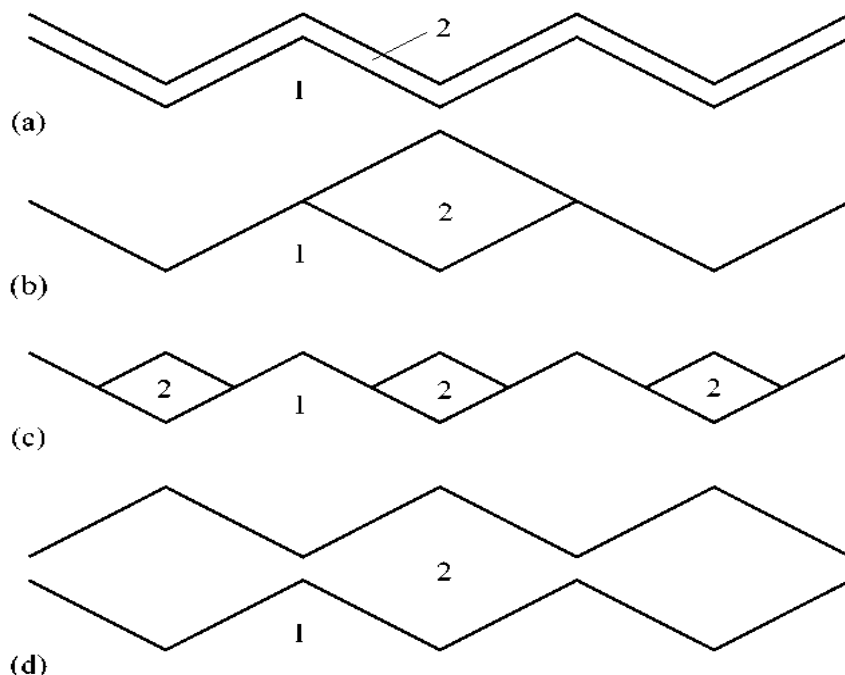


Рисунок 29.2 – Возможные гетероэпитаксиальные структуры на фасетированной поверхности

(1- материал подложки, 2-осажденный материал)

a-однородное покрытие, b – система изолированных «толстых» кластеров, c - система изолированных «тонких» кластеров, d –гетерофазная система при большой толщине покрытия

Таким образом, формирование кластеров при гетероэпитаксиальном росте дает возможность прямого получения изолированных квантовых проволок, сверхрешеток квантовых проволок, квантовых ям с модулированной толщиной.

30. Пористый кремний. Люминесценция и флюоресценция

Пористый кремний был получен в 1956 году в ходе исследования процесса электрохимической полировки кремния в среде HF и считается лабораторным курьёзом. Исследовать материал начали в 90-х, когда обнаружили излучение света при комнатной температуре в видимой части спектра (красно-оранжевой области). Интерес к данному излучению материала на основе кремния вызван тем, что вся полупроводниковая промышленность основана на кремнии, а монокристаллический кремний не может быть использован для создания светоизлучающих устройств, так как его излучающая способность ничтожно мала, а пористый кремний демонстрирует сильную, индуцируемую светом, люминесценцию с энергией более 1,4 эВ при комнатной температуре.

Люминесценцией называется поглощение энергии веществом с последующим её переизлучением в видимом или близком к нему диапазоне. Если эмиссия происходит за время меньше чем 10^{-8} секунды, процесс называется **флюоресценцией**, если наблюдается задержка излучения, то **фосфоресценцией**.

Для формирования пористого кремния используют электролитические ячейки (рис.30.1).

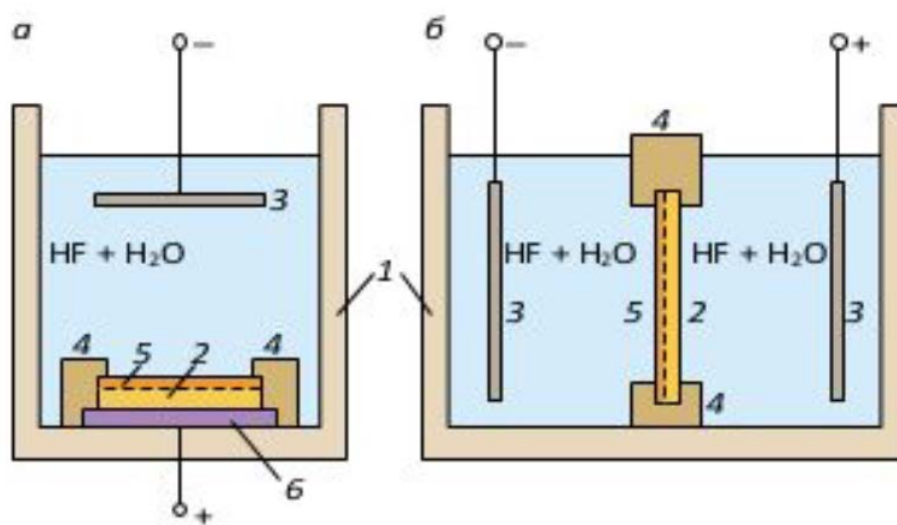


Рисунок 30.1 – Электролитические ячейки для формирования слоев пористого кремния: а – ячейка вертикального типа, б – двухкамерная ячейка с жидкостным контактом к Si. 1 – фторопластовая ванна, 2 – кремниевая пластина, 3 – платиновый электрод, 4 – уплотнители, 5 – слой пористого кремния, 6 – металлический электрод

Проведем анализ зависимости интенсивности фотолюминесценции пористого кремния I от длины волны этого излучения λ , то есть спектра фотолюминесценции $I(\lambda)$. (рис.30.2). Как видно, спектр $I(\lambda)$ представляет собой широкую ($\Delta\lambda \sim 100-200$ нм) бесструктурную полосу, положение максимума которой может смещаться от 750 нм (красный свет) до 450 нм (голубой) при

изменении режимов электрохимической обработки. Таким образом, положение пика в спектре определяется временем травления образца.

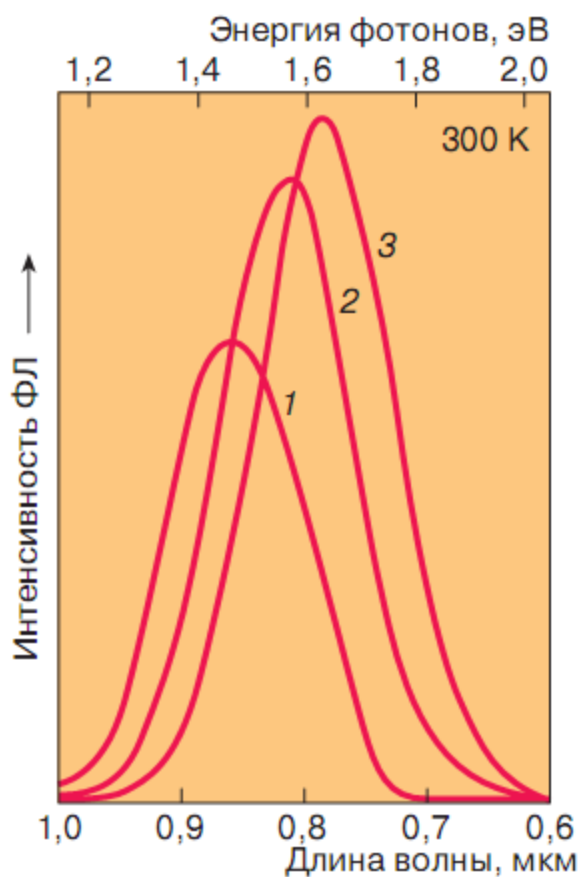


Рисунок 30.1 – Спектры фотолюминесценции пористого кремния после получения и последующего химического травления в плавиковой кислоте
Время обработки (в часах) 1(1), 2(2), 6(3), при этом пористость возрастает от 70% (кривая 1) до 80% (кривая 3)

31. Понятие адсорбции и сорбции

Адсорбция газов и жидкостей играет важную роль в многочисленных физико-химических процессах, протекающих на поверхности твердых тел. Явление адсорбции широко используется в технике, химической технологии, в гетерогенном катализе, высоковакуумной технологии микро и наноэлектроники, а также в научных исследованиях, например, для анализа и разделения сложных газовых и жидких смесей (хроматография), электролитов (ионообменная хроматография), в процессах травления, флотации и стабилизации дисперсных систем и т.д.. Без учета поверхностных явлений невозможно создание новых наноматериалов и технологий их получения.

Сорбция - поглощение твёрдым телом или жидкостью вещества из окружающей среды. Поглощающее тело называется *сорбентом*, поглощаемое им вещество — *сорбатом*. Различают поглощение вещества всей массой жидкого сорбента (*абсорбция*); поверхностным слоем твёрдого или жидкого сорбента (*адсорбция*). *Сорбенты* – это твёрдые тела или жидкости, избирательно поглощающие из окружающей среды газы, пары или растворённые вещества. В зависимости от характера сорбции различают *абсорбенты* — тела, образующие с поглощённым веществом твёрдый или жидкий раствор, *адсорбенты* — тела, поглощающие вещество своей обычно развитой поверхностью, и *химические поглотители*, которые связывают вещество, вступая с ним в химическое взаимодействие.

Все сорбционные явления играют важную и двойную роль в технике, так как создают определенные трудности при создании приборов, устройств и конструкционных материалов, а также их эксплуатации. Непосредственное отношение к сорбционным явлениям имеют два важнейших раздела современной физики: квантовая физика и термодинамика. Именно с позиций этих физических теорий можно объяснить, а также предсказать сорбционные процессы. Например, квантовая теория дает теоретическое обоснование процессов взаимодействия, в то время как термодинамика базируется на эмпирических закономерностях.

При изучении адсорбции пользуются следующей терминологией:

Субстрат – твердая поверхность, на которую осуществляется адсорбция. Под субстратом иногда понимают адсорбирующее вещество или адсорбент.

Адсорбат – адсорбированное вещество. Под ним подразумевают атомы или молекулы, которые адсорбируются на поверхность или способны к адсорбции на субстрат.

Покрытие поверхности – мера величины адсорбции – количество атомов или молекул на поверхности - Θ . Термин покрытие точно не определен и может иметь различное смысловое содержание (вероятность, количество молекул на единицу площади и др).

Экспозиция – это произведение давления на время выдержки в среде, единица измерения – Ленгмюр (Langmuir), $1 \text{ L} = 10^{-6} \text{ Торр} \cdot \text{с}$.

32. Общие понятия о физической и химической адсорбции

Физическая и химическая адсорбции отличаются между собой формированием различных по природе связей между молекулой и поверхностью.

Физическая адсорбция представляет собой самопроизвольный процесс протекающий без поглощения энергии извне. Выделяемая энергия составляет порядка 4 кДж/моль. При физической адсорбции не образуется химического соединения, адсорбат не изменяет свои свойства и при десорбции выделяется в первоначальном виде.

Физическая адсорбция полностью обратима, как и процессы конденсации и испарения. Температурная зависимость физической адсорбции сходна с конденсацией газов: при увеличении температуры количество адсорбированного вещества уменьшается.

Физическая адсорбция вызвана действием слабых сил Ван-дер-Ваальса (10-20 кДж/моль), которые состоят из трёх типов слабых электромагнитных взаимодействий:

- 1) Сила Кеезома (ориентационное взаимодействие) – электростатические силы притяжения или отталкивания между постоянными мультиполями.
- 2) Сила Дебая (индукционное взаимодействие) – поляризационная сила притяжения между постоянным и наведённым мультиполями.
- 3) Лондоновские силы (дисперсионное взаимодействие) – электростатические силы притяжения между мгновенным и наведённым мультиполями нейтральных атомов или молекул.

С точки зрения связи, физическая адсорбция характеризуется отсутствием существенных изменений в электронной плотности, как в адсорбированной молекуле, так и на поверхности. Физическая адсорбированная молекулы при достижении энергии диффузии могут свободно перемещаться по поверхности, но не могут её покинуть. При увеличении температуры они достигают энергии десорбции и покидают поверхность.

Химическая адсорбция сопровождается образованием химического соединения и требует значительной энергии активации. При увеличении температуры процесс ускоряется. Химическая адсорбция избирательна, т.е. зависит от химического сродства адсорбента к субстрату. Хемосорбция сопровождается изменением распределения электронной плотности. Образующаяся при ней связь является ионной или ковалентной и имеет промежуточную между ними природу.

Наиболее точным методом изучения механизма формирования связи и взаимодействия между адсорбированными молекулами и субстратом является спектральный анализ. Например, ИК-спектр позволяет определить колебательные частоты связей субстрата и адсорбата; УФ-спектры определяют энергетику электронных состояний, а также изменение валентных орбиталей адсорбата и субстрата.

33. Связывание молекул с поверхностью. Стадии взаимодействия молекул с поверхностью

Распределение электронной плотности на поверхности ГЦК металла при физической и химической адсорбции двухатомной молекулы показано на рисунке 33.1, из которого видно, что при физической адсорбции наблюдается незначительное изменение формы электронных облаков вследствие слабой поляризации молекулы над поверхностью. При химической форме адсорбции, чаще всего сопровождаемой диссоциацией молекулы, атомы молекулы окружены электронами металла.

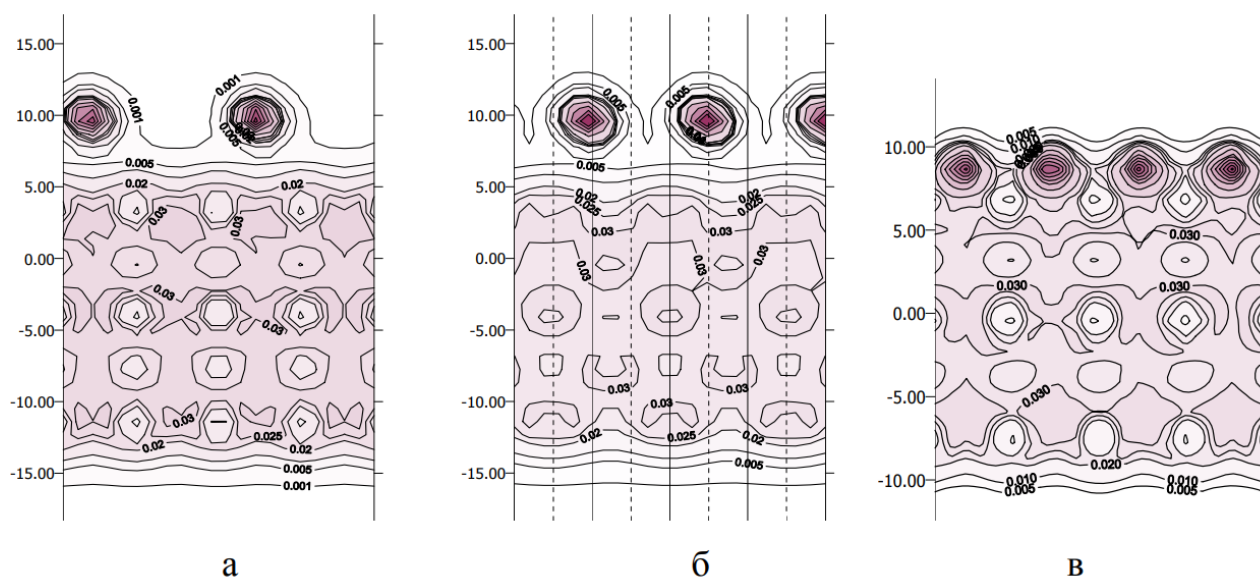


Рисунок 33.1 – Распределение электронной плотности в поперечном сечении поверхности металла при адсорбции молекулы водорода: а, б – физическая адсорбция, в – диссоциативная форма химической адсорбции

Взаимодействие молекул с поверхностью является непрерывным периодическим процессом, который разделяется на пять основных стадий:

- диффузия молекул реагентов к активной поверхности,
- адсорбция одной или нескольких молекул на поверхность,
- поверхностные реакции,
- десорбция продуктов взаимодействия с поверхности
- продуктов взаимодействия диффузия в объем от поверхности.

Данные стадии подчеркивают фундаментальный характер процесса адсорбции, и показывают значимость последующих процессов, включая обратный адсорбции процесс десорбции, в любом технологическом процессе производства.

34. Основные характеристики процесса адсорбции

К основным характеристикам, определяющим процесс адсорбции, относятся температура, кристаллическая структура поверхности, насыщенность поверхности адсорбатом, кинетические параметры и энергетические характеристики процесса.

Характеристика	Физическая адсорбция	Хемосорбция
Природа адсорбции	Не диссоциативная и обратимая	Диссоциативная и необратимая
Насыщенность	Возможно многослойное поглощение	Ограничена одним мономолекулярным слоем
Кинетика адсорбции	Быстрая, не активированная	Переменная, активированная
Интервал температур (в котором происходит адсорбция)	Около или ниже точки конденсации газа (Xe < 100 К, CO ₂ < 200 К)	Фактически неограниченный (конкретная молекула эффективно адсорбируется в узком интервале T)
Энтальпия адсорбции	Зависит от молекулярной массы и полярности, обычно 5-40 кДж/моль	Изменяется в широких пределах, соответствующих прочности химической связи - 40-800 кДж/моль
Атомная структура поверхности	Энергия адсорбции слабо зависит от атомной геометрии поверхности	Значительное изменение энергии адсорбции на разных кристаллографических плоскостях

35. Механизмы физической адсорбции

Физическая адсорбция осуществляется по четырём механизмам:

- 1) неполярная молекула и неполярный адсорбент;
- 2) полярная молекула и неполярный адсорбент;
- 3) неполярная молекула и полярный адсорбент;
- 4) полярная молекула и полярный адсорбент.

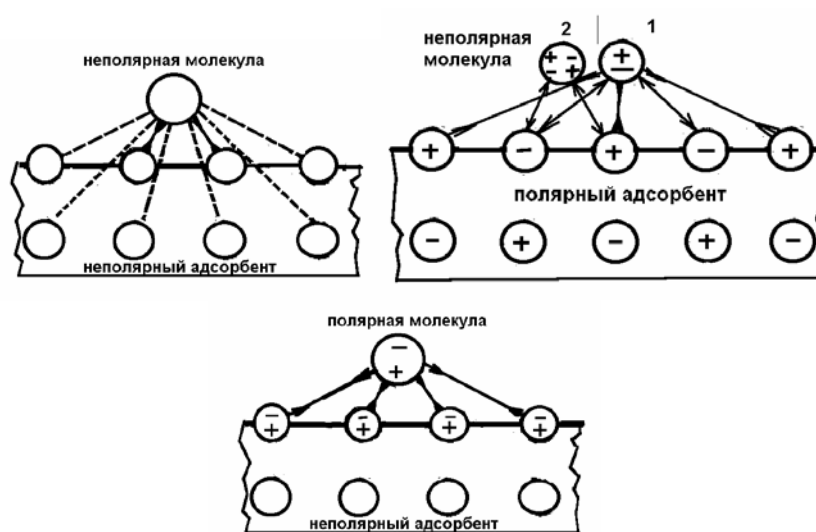
Рассмотрим эти механизмы подробнее.

1) Связь между *неполярными молекулами* (O_2, H_2) и *неполярными адсорбентами* (графит, алмаз) возникает благодаря действию сил, обусловленным колебаниями электронного облака молекул. Потенциальная энергия взаимодействия неполярных молекул с одним атомом неполярной решётки твёрдого тела описывается:

$$U = Cr^{-6} + Br^{-12},$$

где r – расстояние между центрами частиц; C и B – константы.

Первый член этого выражения характеризует притяжение, а второй – отталкивание взаимодействующих частиц. Основной вклад во взаимодействие вносят ближайшие частицы (рисунок 35.1, а).



а)

б)

в)

Рисунок 35.1 – Механизмы физической адсорбции:
а – неполярная молекула и неполярный адсорбент;
б – неполярная молекула и полярный адсорбент,
в - полярная молекула и неполярный адсорбент,

2) Если субстрат является *полярным*, то в зависимости от положения адсорбированной молекулы, к дисперсионным силам добавляются индукционные. Положительные и отрицательные ионы решётки инициируют

в неполярных молекулах заряды противоположного знака. В результате возникает дополнительное электростатическое притяжение (рисунок 35.1, б).

При этом если атомы на поверхности кристалла расположены так, что отрицательные и положительные заряды чередуются, величина индуцируемого заряда в неполярной молекуле зависит от её положения над поверхностью. В положении 1 (рисунка 35.1,б) эта величина максимальна, в положении 2 – равна нулю, так как индукционные силы, действующие на молекулу, имеют противоположные знаки. В этом случае силы адсорбции над ионами больше, чем между ними.

3) При адсорбции *полярных молекул на неполярных адсорбентах*, диполь (зеркальное отражение) полярной молекулы индуцирует на субстрате и возникает взаимодействие, которое зависит от положения диполя и поляризуемости атомов поверхности. Силы притяжения больше, чем в случае 2, так как атомы решётки действуют согласованно. Этот вид адсорбции характерен для молекул воды.

4) Взаимодействие полярных адсорбента и молекулы аналогичные адсорбции неполярной молекулы на полярную поверхность (рис. 35.1, б).

36. Механизмы взаимодействия атомов при физической адсорбции

Рассмотрим силу взаимодействия между частицами на примере атома поверхности (m_1) и молекулы адсорбата (m_2).

Между телами в природе существуют гравитационные и электромагнитные силы. Так как массы молекул крайне малы, то силы гравитационного взаимодействия между ними можно не рассматривать. На больших расстояниях электромагнитного взаимодействия между молекулами тоже нет.

При уменьшении расстояния между частицами (см. рисунок 36.1) они начинают ориентироваться так, что их обращённые друг к другу стороны будут иметь разные по знаку заряды (в целом молекулы остаются при этом нейтральными), и, в итоге, между ними возникают силы притяжения (максимальная сила притяжения на расстоянии 2–3 диаметров молекулы). При уменьшении расстояния между частицами возникают силы отталкивания как результат взаимодействия отрицательно заряженных электронных оболочек атомов молекул. Следовательно, на молекулу действует сумма сил: притяжения и отталкивания (на больших расстояниях преобладает сила притяжения, на малых – сила отталкивания). Величина r_0 – это такое расстояние между молекулами, на котором силы притяжения становятся равными силам отталкивания (положение устойчивого равновесия).

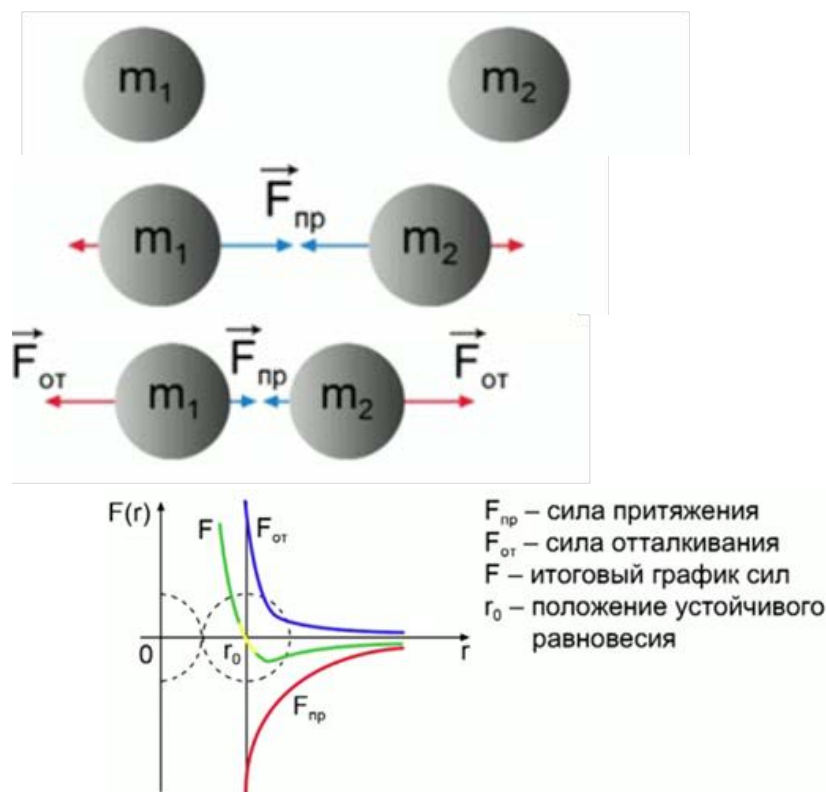


Рисунок 36.1 - График зависимости силы взаимодействия между молекулой и атомом поверхности в зависимости от расстояния между ними

37. Энергия взаимодействия атома поверхности и молекулы адсорбата при физической и химической адсорбции

Рассмотрим зависимость энергии взаимодействия атома поверхности и молекулы адсорбируемого вещества от расстояния.

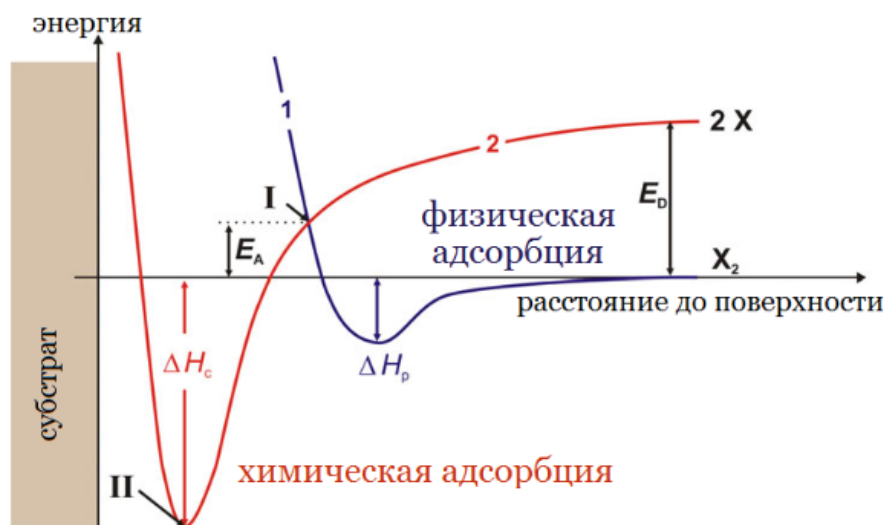


Рисунок 37.1 - Схематическая диаграмма потенциальной энергии молекулы X_2 , как функция от расстояния до поверхности

На рисунке 37.2 показано изменение потенциальной энергии при физической адсорбции (кривая 1). Можно видеть слабый минимум, который находится сравнительно далеко от поверхности (более 3\AA). Если между адсорбированными молекулами отсутствуют сильные межмолекулярные взаимодействия, то при повышенных температурах (например, комнатной) они весьма мобильны и на поверхности наблюдаются диффузионные процессы. С другой стороны, увеличение температуры приводит к уменьшению времени пребывания молекулы на поверхности. Например, если при 100K оно измеряется несколькими секундами, то при комнатной температуре — около 10^{-8} с.

Если адсорбируемые молекулы образуют с поверхностью ковалентные или ионные связи, то такой процесс называется химической адсорбцией или хемосорбцией. Очевидно, что энергия этого типа адсорбции значительно выше, чем при физической. Разницу в изменении потенциальной энергии можно увидеть на рисунке 37.2 (кривая 2). Видно, что хемосорбция имеет более глубокий минимум потенциальной энергии, который находится ближе к поверхности. В реальных системах довольно часто реализуются сразу оба типа адсорбции. Например, при адсорбции H_2 на поверхности Ni сначала происходит физическая адсорбция с $\delta H_p = -4$ кДж/моль, где атом задерживается на расстоянии $3,2\text{\AA}$ от поверхности. Затем, после прохождения точки I происходит диссоциативная химическая адсорбция в результате которой образуются связи $Ni-H$. Потенциальная энергия достигает минимума на расстоянии $1,6\text{\AA}$, где $\delta H_c = -46$ кДж/моль.

38. Основные механизмы хемосорбции на твердых телах (4 случая взаимодействия)

Электронные уровни при химической адсорбции атомов на чистых металлах:

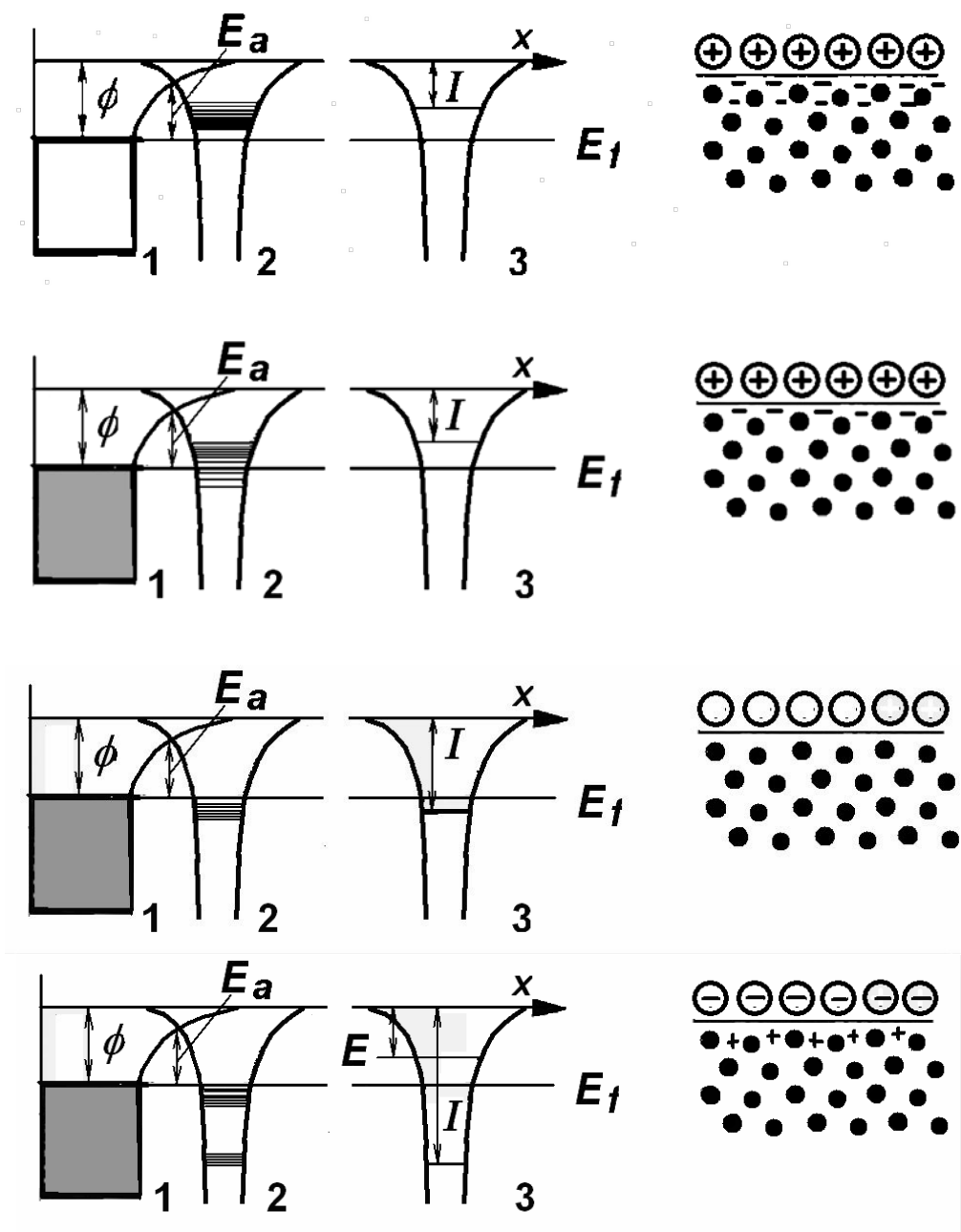


Рисунок 38.1 – Зонные структуры: 1 – металлов; 2 – адатома; 3 – свободного атома

При сближении с металлом у свободного атома происходит расщепление энергетических уровней, которые тем больше, чем больше потенциал энергии электронов данного атома. Различают 4 случая:

1) Потенциал ионизации тока свободного атома меньше потенциала выхода электронов из металла. При сближении атома с металлом происходит такое расщепление зон, что самые низкие из

уровней лежат выше уровня Ферми. В этом случае валентный электрон адатома может занять свободный энергетически уровень металла, преодолев потенциальный барьер E_a . Данное расстояние равно нескольким ангстрем. Механизм преодоления данного барьера объясняется туннельным эффектом. Т.к. уровень электронов у адатома выше чем у металлов, вероятность перехода электрона от адатома к металлу намного больше, чем в обратном направлении. Система переходит в устойчивое состояние с минимальной энергией, в которой электронная плотность распределяется так, что ей наибольшее значение находится в объеме металла. Адатомы ионизируются и на поверхности образуется слой положительных ионов;

2) I меньше F , но при расщеплении энергетических уровней, часть уровней лежит ниже уровня Ферми. В этом случае часть электронов металла может перейти на свободные нижние уровни адатома, но переход электронов от адатома к металлу более вероятен; электронные облака распределены по объему металла и адатомов, но электронная плотность в металлах больше. Поэтому заряд адатома оказывается положительным, но меньше чем в первом случае;

3) $I \approx F$. Верхний расщеплённый уровень совпадает с уровнем Ферми металла. Вероятности перехода электронов из адатома в металл и обратно становятся одинаковыми, и слой адатомов становится электрически нейтральными;

4) $I > F$. При сближении атомов, электронные уровни расщепляются таким образом, что все они находятся ниже уровня Ферми. Это приводит к переходу электронов из металла к адатому и они заряжаются отрицательно.

Число возможных вариантов связывания молекул при химической адсорбции на металл зависит от конкретного сочетания «металл-адатом».

39. Основные теории адсорбции

Первое теоретическое описание кинетики адсорбции дано Ленгмюром. При выводе уравнения изотермы адсорбции Лэнгмюр исходил из возможности реализации на практике следующих *предположений*:

- адсорбционные центры адсорбента являются однородными и равномерно распределены на его поверхности;
- адсорбированная молекула занимает на поверхности адсорбента только один адсорбционный центр;
- взаимодействие между адсорбированными молекулами в адсорбционном слое отсутствует;
- процесс адсорбции завершается образованием мономолекулярного адсорбционного слоя, когда все адсорбционные центры заняты молекулами адсорбирующегося вещества (рис.39.1,а).

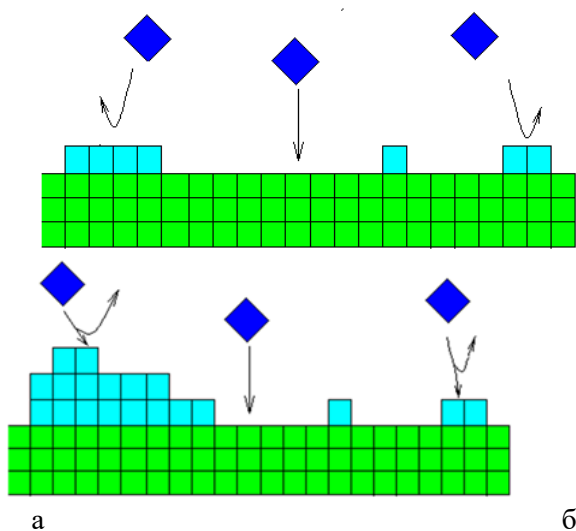
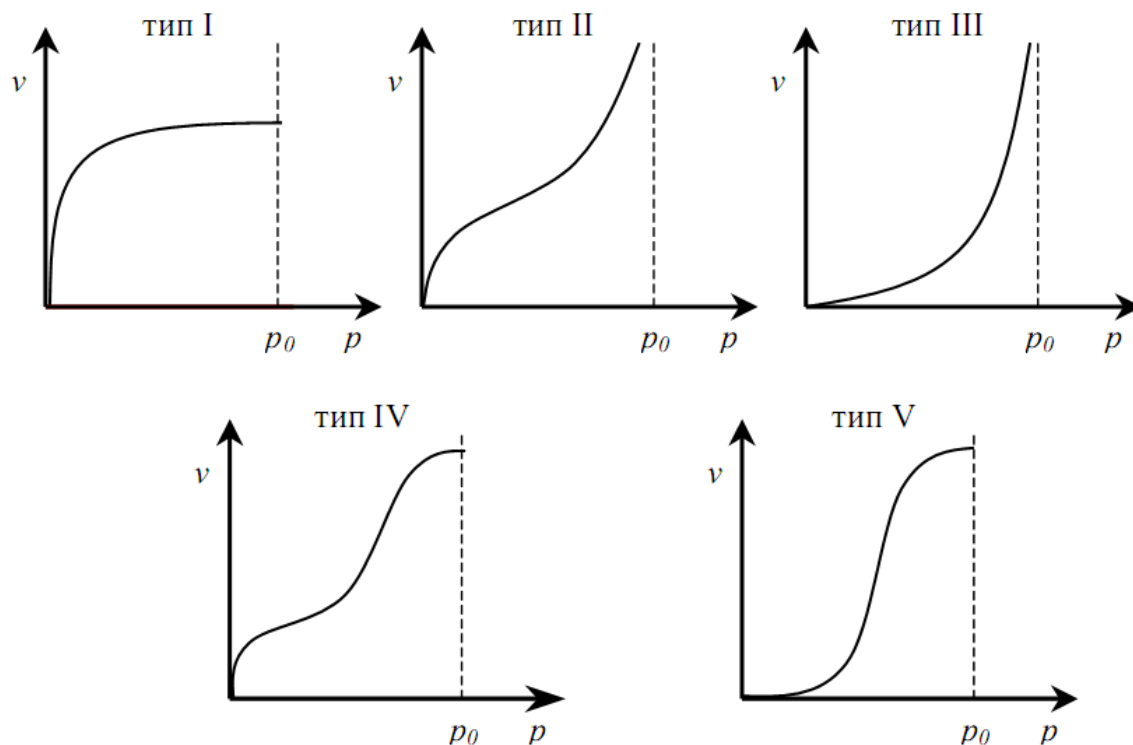


Рисунок 39.1 – Схематичное изображение адсорбции согласно теории Ленгмюра (а) и БЭТ (б)

Однако адсорбционные процессы не всегда протекают только таким образом. Если молекулы, образующие насыщенный адсорбционный слой, сильно поляризованы под действием силового поля адсорбента, тогда они сами обладают способностью взаимодействовать с молекулами, находящимися в растворе и образовывать второй адсорбционный слой. Молекулы второго адсорбционного слоя в свою очередь тоже поляризуются, и может произойти адсорбция третьего слоя. Таким образом, имеет место протекание процесса полимолекулярной адсорбции.

Теория БЭТ (Брунауэра, Эммета и Теллера) предполагает возможность адсорбции частиц поверх уже имеющихся адсорбированных слоёв (рисунок 39.2,б). После анализа многочисленных реальных изотерм адсорбции ими была предложена их классификация на основе выделения пяти основных типов изотерм.

Изотермы типа I отражают мономолекулярную адсорбцию. Изотермы типа II и III обычно связывают с образованием при адсорбции многих слоев, то есть с *полимолекулярной* адсорбцией. Причем, в случае II взаимодействие адсорбент - адсорбат сильнее взаимодействия адсорбат - адсорбат, а в случае III - наоборот. Изотермы типа IV и V отличаются тем, что для них характерна конечная адсорбция при приближении давления пара к давлению насыщения P_0 . Изотермы типа II и III характерны для адсорбции на не пористом адсорбенте, а типа IV и V - на пористом твердом теле (рисунок 39.3).



V -объем адсорбированного вещества, P-давление,
 P_0 - давление насыщенного пара

Рисунок 39.3- Изотермы адсорбции БЭТ

40. Скорость адсорбции

Скорость адсорбции $v_{\text{адс}}$ молекулы на поверхности определяется через парциальное давление молекул:

$$v_{\text{адс}} = k' P^x,$$

Где x – порядок кинетики; P – парциальное давление; k' – постоянная скорости.

В целом скорость адсорбции можно записать в форме уравнения Арениуса и получим кинетическое уравнение:

$$v_{\text{адс}} = A \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) P^x,$$

Где E_a – энергия активации адсорбции; A – предэкспоненциальный частотный множитель.

Выразим скорость адсорбции как произведение падающего молекулярного потока F и коэффициента прилипания S :

$$v_{\text{адс}} = SF \text{ [молекул} \times \text{м}^{-2}\text{с}^{-1}\text{]}$$

Поток падающих молекул даётся уравнением Герца-Кнудсена:

$$F = \frac{P}{(2\pi m k T)^{\frac{1}{2}}} \text{ [молекул м}^{-2}\text{с}^{-1}\text{]},$$

де P – давление газа [Па], m - молекулярная масса [кг], T – температура [К].

Вероятность прилипания можно представить как:

$$S = f(\theta) \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right),$$

Где $f(\theta)$ – некоторая функция покрытия поверхности адсорбатом.

Объединение уравнений для S и F производит к следующему выражению для скорости адсорбции:

$$V_{\text{ads}} = \frac{f(\theta)P}{\sqrt{2\pi m k T}} e^{-\frac{E_a}{RT}}$$

Данное уравнение показывает, что скорость адсорбции линейно связана с парциальным давлением молекул, находящихся в газовой фазе над поверхностью. Энергия активации адсорбции может зависеть от степени

покрытия поверхности. Если вероятность прилипания прямо пропорциональна концентрации свободных поверхностных вакансий, что справедливо в первом приближении для молекулярной адсорбции, то функция $f(\Theta)$ будет пропорциональна $(1-\Theta)$, где Θ – покрытия поверхности или число занятых из возможных адсорбционных положений (определение Ленгмюра).

41. Процессы десорбции. Скорость десорбции

Скорость десорбции ϑ_{des} адсорбата с поверхностью выражается формулой:

$$\vartheta_{des} = n_{des} N^x,$$

Где n_{des} – постоянная процесса десорбции; x – порядок кинетики десорбции; N – поверхностная концентрация адсорбата.

Рассмотрим некоторые случаи определения порядка десорбции. Его можно определить при анализе элементарного шага реакции.

1) Атомная и простая молекулярная десорбция заключается в отрыве атома или молекулы от поверхности и перехода их в газовую или жидкую фазу. Элементарный шаг – разрыв связи атома или молекулы с поверхностью.

2) Рекомбинационная молекулярная десорбция заключается в том, что десорбция происходит в 2 этапа: отрыв атома или молекулы от поверхности и образование исходной или новой молекулы.

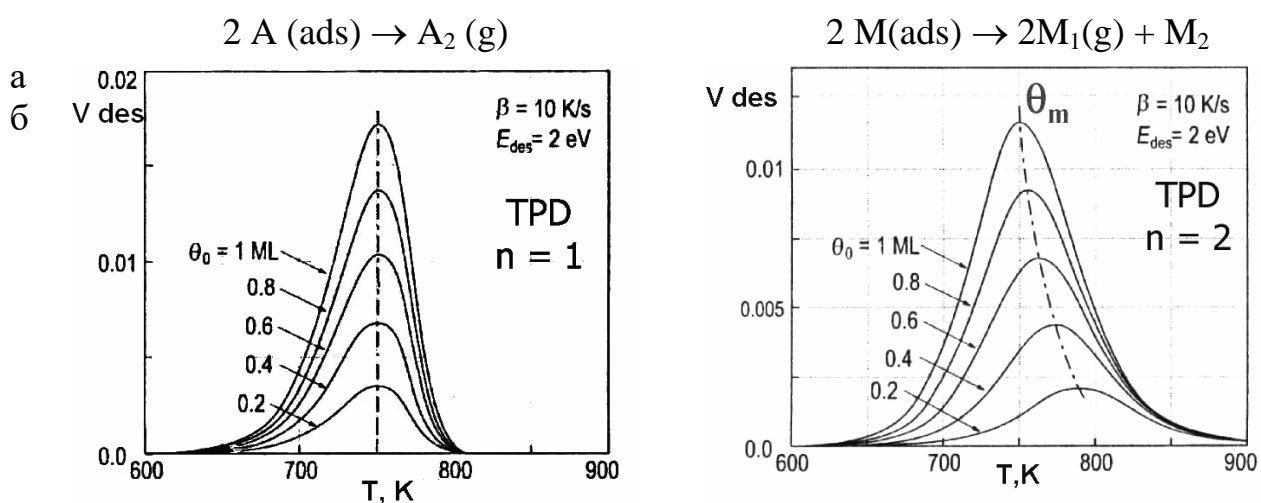


Рисунок 41.1 - Кривые десорбции первого и второго порядка

Примером рекомбинационной молекулярной десорбции являются десорбция O_2 с поверхности платины.

Второй величиной, входящей в выражение для скорости десорбции является постоянная скорости, которая может быть выражена в форме уравнения Аррениуса:

$$n_{des} = A \exp(-E_a^{des} / RT)$$

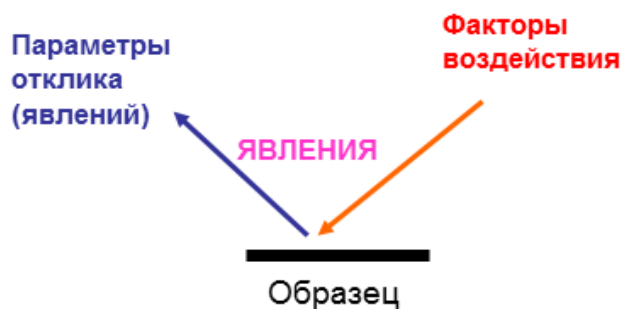
где E_a^{des} - энергия активации десорбции, A - предэкспоненциальный множитель физический смысл которого заключается в "частоте попыток" молекулы,

необходимых для преодоления энергетического барьера десорбции - v , то есть $A = v$.

В результате получим следующее выражение для скорости десорбции

$$V_{des} = -\frac{dN}{dt} = vN^x \exp\left(-\frac{E_a^{des}}{RT}\right)$$

42. Общие представления о методах анализа поверхности



Факторы воздействия:

1. Пучки электронов и ионов килоэлектронвольтных (кэВ-х) энергий;
2. Фотоны ультрафиолетового и рентгеновского диапазонов;
3. Электростатические поля;
4. Температура.

Параметры отклика:

1. В электронной и фотонной спектроскопиях:
Форма и интенсивность энергетических спектров вторичных электронов, ионов и фотонов.
2. В ионной спектроскопии:
Состав и интенсивности массовых линий в спектрах масс вторичных ионов.

Важнейшие инструментальные группы, необходимые для осуществления эксперимента по диагностике поверхности являются:

1. Источники воздействия (электронные и ионные пушки или ускорители, источники рентгеновских, ультрафиолетовых и др. γ -квантов);
2. Анализаторы (энергетические, массовые, монохроматоры);
3. Детекторы отклика поверхности [цилиндры Фарадея, вторичные электронные и фотоэлектронные умножители (ВЭУ и ФЭУ), микроканальные пластины];
4. Электронно- и ионно-оптические устройства;
5. Высокий или СВВ;
6. Электронные приборы, обеспечивающие работу указанных приборов и устройств (в том числе, блоки питания, измерительные приборы, вычислительная техника).

42. Физические явления, лежащие в основе диагностики поверхности

1. Ионная эмиссия (ИЭ):

- a) ускоренные до энергий 1–10 КэВ ионы или атомы – это ионно-ионная или вторичная ионная эмиссия (ВИЭ);
- b) нагревание материала - это термо-ионная эмиссия (ТИЭ);
- c) электрические поля напряжённостью $\sim 10^7$ В/см - это полевая ионная эмиссия (ПИЭ);
- d) облучение материала фотонами - это фото-ионная или радиационно- стимулированная ионная эмиссия;
- e) облучение материала электронами - это электронно-ионная эмиссия (ЭИЭ).

3) Электронная эмиссия (ИЭ) - аналогично п.1 в зависимости от возбуждающего фактора:

- a) ионно-электронная эмиссия (ИЭЭ);
- b) термо-электронная эмиссия (ТЭЭ);
- c) полевая электронная эмиссия (ПЭЭ);
- d) фото-электронная эмиссия (ФЭЭ);
- e) электронно-электронная или вторичная электронная эмиссия (ВЭЭ);

2. Фотонная эмиссия (ИЭ) - аналогично пп. 1 и 2 в зависимости от возбуждающего фактора:

Эмиссия \neq спектроскопия;

Эмиссия – явление;

Спектроскопия – метод, основанный на данном явлении;

Эмиссия – объект фундаментальных исследований;

Спектроскопия – прикладной аспект фундаментальных исследований эмиссий, позволяющий получать информацию о составе и структуре поверхности и твердого тела в целом.

43. Ионное распыление и вторичная ионная эмиссия

Вторичная ионная эмиссия лишь одно из явлений, наблюдающихся при ионной бомбардировке поверхности, естественно, оно связано со всеми остальными, поэтому было бы неправильно рассматривать его в отрыве от других.

Виды:

- 1) Ионно-ионная или вторичная ионная эмиссия (ВИЭ) - при воздействии на поверхность ускоренными до энергий 1–10 КэВ ионами или атомами;
- 2) Термо-ионная эмиссия (ТИЭ) – при нагревании поверхности материала;
- 3) Полевая ионная эмиссия (ПИЭ) – при приложении к поверхности электрических полей напряжённостью $\sim 10^7$ В/см;
- 4) Фото-ионная или радиационно-стимулированная ионная эмиссия - при облучении поверхности материала фотонами;
- 5) Электронно-ионная эмиссия (ЭИЭ) - при облучении поверхности материала электронами.

Основными явлениями при ионной бомбардировке являются:

- a) объёмное и поверхностное рассеяние бомбардирующих ионов (в том числе с изменением их зарядового состояния);
- b) эмиссия заряженных и нейтральных частиц и их комплексов: распыление, ВИЭ, ионно-электронная эмиссия (ИЭЭ), ионно-стимулированная десорбция (ИСД) с поверхности твёрдого тела;
- c) испускание электромагнитного излучения с широким спектром частот (ионолюминесценция, ионно-фотонная эмиссия (ИФЭ), рентгеновское излучение);
- d) различные радиационные процессы, в т. ч. образование дефектов как в объёме твёрдого тела, так и на его поверхности.

44. Термо-ионная эмиссия

Термо-ионная эмиссия состоит из:

1) Термической десорбции (ТД) – процесс, в котором атом или молекула адсорбата получает от тепловых колебаний атомов поверхности энергию достаточную, чтобы уйти из адсорбционной потенциальной ямы и покинуть поверхность.

2) Поверхностной ионизации (ПИ) – образование ионов в процессе термической десорбции частиц с поверхности твёрдого тела.

$$\text{ТИЭ} = \text{ТД} + \text{ПИ}$$

Скорость десорбции r_d описывается выражением:

$$r_d = -\frac{d\theta}{d\tau} = k_n \theta^n = k_n^0 \theta^n \exp\left(-\frac{E_d}{k_B T}\right),$$

где θ – покрытие адсорбата, E_d – энергия активации десорбции, n – порядок кинетики десорбции, k_n – константа скорости десорбции; k_B – постоянная Больцмана; T – температура поверхности.

Для того чтобы покинуть поверхность, адсорбированная частица (атом или молекула) должна преодолеть активационный барьер для десорбции, называемый энергией десорбции E_d .

Если частицы находятся в хемосорбированном состоянии, энергия десорбции равна сумме энергии химической связи и энергии активации адсорбции:

$$E_{des} = E_{\text{акт адс}} + E_{\text{хим}}$$

Если частица находится на поверхности в состоянии физической адсорбции (физисорбции), энергия десорбции равна просто энергии активации адсорбции:

$$E_{des} = E_{\text{акт адс}}$$

Поверхностная ионизация (ПИ) – образование ионов в процессе термической десорбции частиц с поверхности твёрдого тела.

Путём ПИ могут образовываться положительные и отрицательные ионы (последние, если частица обладает сродством к электрону) атомов, молекул, радикалов и ассоциатов (последние образуются присоединением к молекуле атома, не входящего в состав молекулы).

ПИ – термически равновесный процесс, испарившиеся частицы имеют больцмановское распределение по энергии с температурой T , равной температуре твёрдого тела.

45. Полевая ионная эмиссия

Явление ПИЭ рассматривается как совокупность явлений десорбции (и(или) испарения) полем с последующей полевой ионизацией.

Десорбция полем - удаление адсорбированных на поверхности твердого тела атомов или молекул сильным электрическим полем (напряженностью $E \sim 10^7-10^{10}$ В/см). Это явление наблюдается в широком интервале температур, в том числе при сколь угодно низких.

Удаление сильным полем собственных атомов поверхности твердого тела называется *испарением полем*.

Наиболее полно данный вид десорбции изучен с металлических подложек в поле, ускоряющем положительные ионы. Десорбцию и испарение полем можно рассматривать как термическое испарение атомов, преодолевающих потенциальный барьер, сниженный сильным электрическим полем. Таким образом, ПИЭ можно рассматривать и как поверхностную ионизацию атомов при десорбции и испарении полем.

ПИЭ = десорбция и (или)испарение полем + полевая ионизация

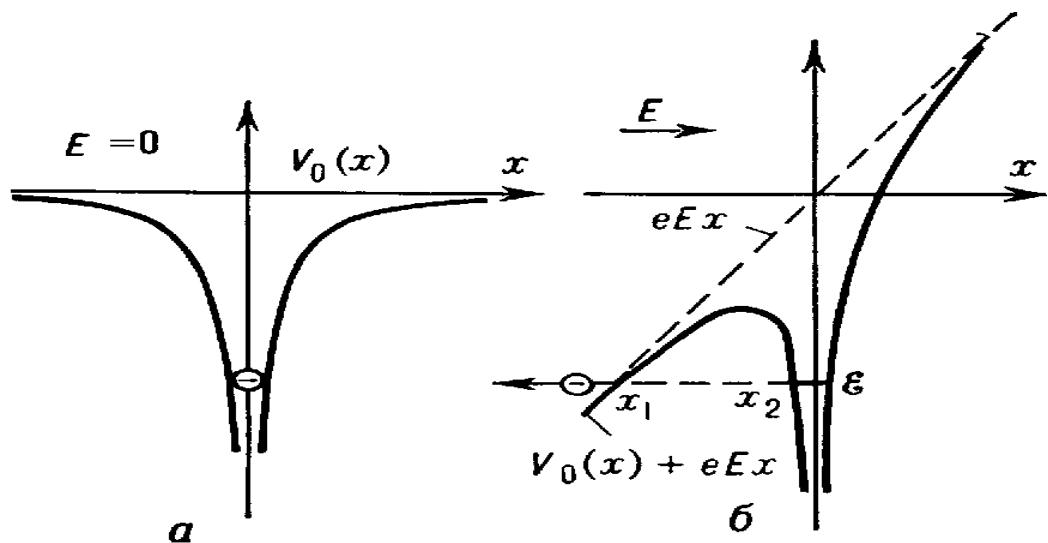


Рисунок 45.1 - Диаграммы потенциальной энергии электрона в атоме в пространстве без поля (а) – симметричная яма и при наличии поля (б) – ассиметричная яма

46. Вторичная электронная эмиссия

ВЭЭ – испускание электронов (вторичных) поверхностью твёрдых тел при её бомбардировке ускоренными до нескольких кэВ электронами же, которые называют первичными. В целях анализа поверхности энергия первичных электронов $E_{\text{п}}$ как правило ≈ 2 кэВ.

• Промежуток времени между входом в мишень первичных и выходом вторичных электронов не превышает $10^{-14} - 10^{-12}$ с.

Если облучаемая первичными электронами мишень, имеет толщину меньшую, чем пробег первичных электронов, вторичные электроны эмитируются как со стороны бомбардируемой поверхности (ВЭЭ "на отражение"), так и с её обратной стороны (ВЭЭ "на прострел").

Среди эмитируемых (вторичных) электронов принято выделять следующие группы различающиеся энергией и механизмом эмиссии:

1. Упруго отраженные от поверхности первичные электроны ($E \approx E_{\text{п}}$);
2. Квазиупруго отраженные электроны, то есть испытавшие характеристические потери энергии до сотен мэВ на возбуждение колебаний кристаллической решетки ($E = E - E_{\text{потерь}}$);
3. Неупруго отражённые первичные электроны ($E > 50$ эВ);
4. Истинно вторичные электроны – ИВЭ ($E \leq 50$ эВ);
5. Оже-электроны, возникающие в результате оже-процесса в основных атомах (о этом разговор особый).

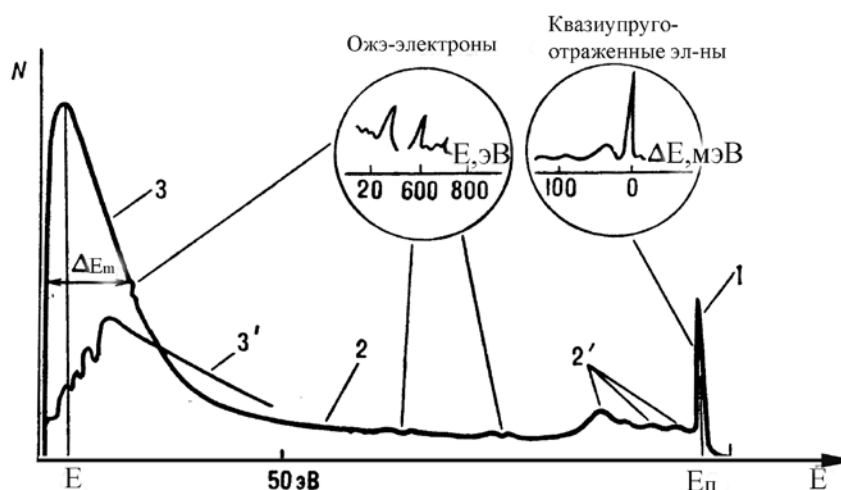


Рисунок 46.1 - Энергетический спектр вторичных электронов:

- 1 – упруго и квазиупруго отраженные электроны;
- 2 – неупруго отражённые электроны (в т. ч. с характеристическими потерями энергии – 2');
- 3 – истинно вторичные электроны;
- 3' – пример спектра истинно вторичных электронов для плоскости (100) монокристалла W

Количественные характеристики ВЭЭ:

Коэффициент ВЭЭ σ :

$$\sigma = \frac{I_B}{I_{\Pi}} = \delta + \eta + r,$$

Где I_B, I_{Π} – токи всех вторичных и первичных электронов; $\delta + \eta + r$ – коэффициенты, соответственно, истинной ВЭЭ, неупругого и упругого отражения первичных электронов. Коэффициенты δ, η, r представляют собой величины, усреднённые по большому числу элементарных актов эмиссии, вызванных отдельными первичными электронами.

При $E_{\Pi} < 100\text{эВ}$, $\sigma \approx \delta + r$;

При $E_{\Pi} > 100\text{эВ}$, $\sigma \approx \delta + \eta$.

Коэффициенты σ, δ, η, r зависят от:

- E_{Π} ,
- угла φ падения первичных электронов,
- атомного номера Z и структуры вещества,
- состояния поверхности,
- температуры (в случае ВЭЭ диэлектриков),
- индексов $\{hkl\}$ грани поверхности, и др. параметров.

47. Оже-электронная эмиссия. Оже-процесс

В спектре вторичных электронов есть группы электронов, энергия которых не зависит от энергии первичных электронов, а определяется атомами, испустившими эти электроны. Это - оже-электроны - основа электронной оже-спектроскопии (ЭОС).

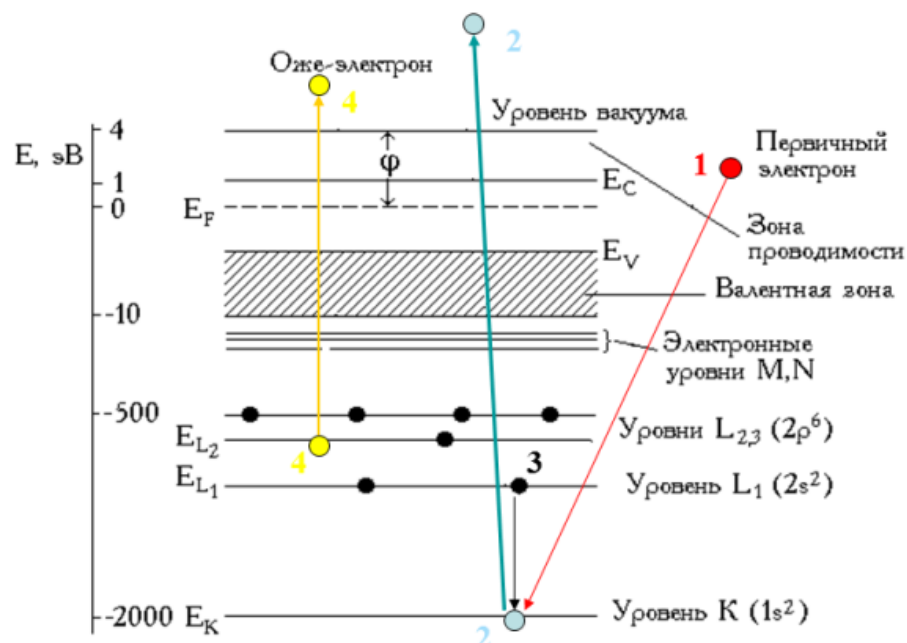


Рисунок 46.1 – Схема Оже-процесса

Первичный электрон с энергией $E_{\text{п}}$ создает вакансию на уровне $E_{\text{к}}$ атома. Образовавшаяся вакансия через время $t \sim 10^{-14} - 10^{-16}$ с заполняется электроном с какого-либо верхнего уровня (в примере с уровня L_1). Избыток энергии $E_{\text{к}} - E_{L_1}$ может освободиться одним из двух путей: 1) излучения рентгеновского кванта с энергией $\hbar\omega = E_{\text{к}} - E_{L_1}$. 2) Оже-процесса. В этом случае избыточная энергия передается третьему электрону находящемуся, например, на уровне L_2 .

Оже электрон испускается в вакуум с энергией:

$$E_A = E_{\text{к}} - E_{L_1} - E_{L_2} - U(L_1, L_2)$$

Слагаемое U в формуле учитывает, что в конечном состоянии атом оказывается дважды ионизованным в результате образования вакансий на уровнях L_1 и L_2 . Он учитывает увеличение энергии связи L_2 -электрона, когда удален L_1 -электрон и L_1 -электрона при наличии вакансии на уровне L_2 .

Для вычисления слагаемого $U(L_1, L_2)$ используют эмпирическое соотношение, достаточно хорошо согласующееся с экспериментальными результатами:

$$U(L_1, L_2) = \frac{1}{2} (E_{L_2}^{Z+1} - E_{L_2}^Z + E_{L_1}^{Z+1} - E_{L_1}^Z),$$

Где Z – атомный номер элемента.

48. Термо-электронная эмиссия

ТЭЭ – испускание электронов нагретыми телами (эмиттерами) в вакуум или другую среду. Выйти из твердого тела могут только те электроны, которые получают дополнительную энергию, необходимую для преодоления потенциального барьера.

При отсутствии поля, "вытягивающего" вылетевшие электроны, они образуют вблизи поверхности эмиттера отрицательный пространственный заряд, ограничивающий ток ТЭЭ.

Если же такое поле существует, то при малых напряжениях $V < V_0$ между эмиттером и анодом в соответствии с теорией Ленгмюра плотность тока ТЭЭ $J \sim V^{3/2}$. При $V > V_0$ пространственный заряд "рассасывается", и ток достигает насыщения $J = J_0$.

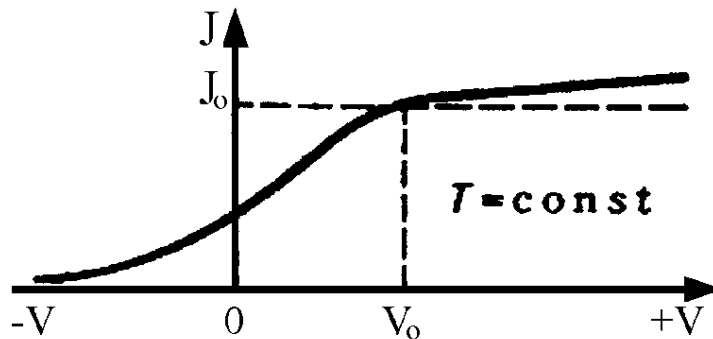


Рисунок 48.1 – Зависимость плотности тока от напряжения при ТЭЭ

Плотность тока насыщения J_0 можно вычислить по формуле Ричардсона -Дэшмана:

$$j_0 = AT^2 \exp\left(-\frac{\Phi}{kT}\right),$$

Здесь $A = A_0(1 - r)$, r – усредненный по энергиям коэффициент отражения электронов от поверхности; $A_0 = 4\pi e k^2 m / \hbar^3 = 120.4 \text{ А/см}^2\text{К}^2$ где e – заряд электрона, m – масса электрона; Φ – работа выхода электрона.

$$-\ln \frac{j_0}{AT^2} = \Phi \frac{1}{kT},$$

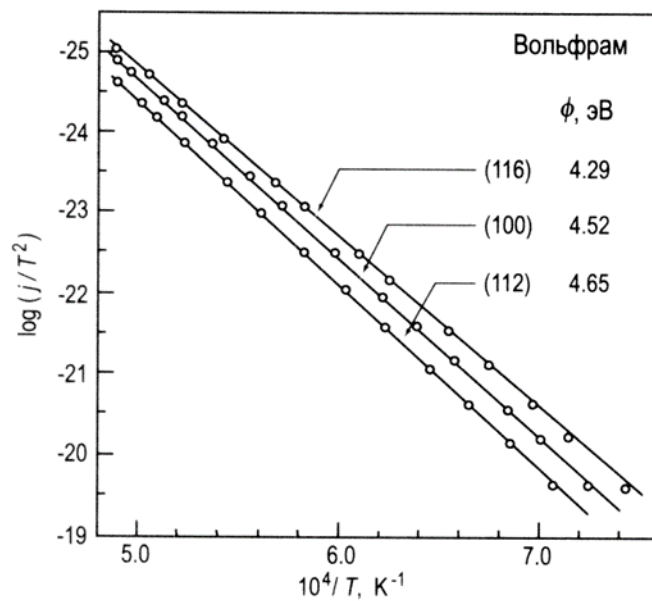


Рисунок 48.1 - График Ричардсона-Дэшмана для термоэлектронной эмиссии с различных граней кристалла вольфрама

49. Ионно-электронная эмиссия

ИЭЭ - испускание электронов твёрдым телом при бомбардировке ионами.

Различают потенциальное вырывание электронов из поверхности (потенциальная ИЭЭ) и кинетическое выбивание (кинетическая ИЭЭ).

Потенциальное вырывание связано с передачей электронам мишени энергии, выделяющейся при переходе бомбардирующего иона в основное состояние атома. Если к поверхности металла приближается ион, не занятый энергетический уровень которого лежит ниже уровня Ферми электронов в металле, то один из электронов проводимости перейдёт на не занятый уровень атома (нейтрализует ион).

Кинетическое выбивание обусловлено ударной ионизацией атомов поверхностного слоя мишени и бомбардирующих частиц. Для него характерен энергетический порог E_n (энергия, ниже которой этого вида эмиссии не наблюдается). При бомбардировке тугоплавких металлов ионами тяжелее Li^+ , $E_{II} > 1$ кэВ; для диэлектриков, например, щёлочногалоидных кристаллов, $E_{II} \sim 0,1 - 0,2$ кэВ.

При ИЭЭ в вакуум выходят как электроны атомов мишени, так и самих бомбардирующих частиц. Некоторое количество электронов возбуждается быстрыми атомами отдачи. Распределение эмитированных электронов по энергиям при кинетическом выбивании имеет максимум ($\sim 1-3$ эВ) и протяженный спад, на котором выделяются пики и ступеньки, связанные с оже-переходами в соударяющихся частицах и другими процессами (рис. 49.1).

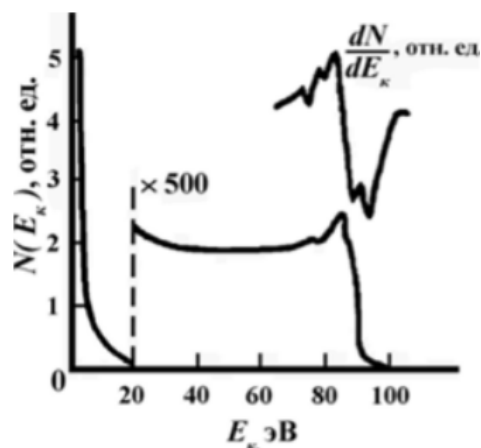


Рис. 3.6. Энергетический спектр электронов при ИЭЭ (кинетическое выбивание)

Потенциальная и кинетическая ИЭЭ металлов разделены в пространстве и во времени. При подлете ионов к поверхности сначала происходит их нейтрализация и испускаются электроны, обуславливающие потенциальную ИЭЭ. Затем при соударениях атомных частиц возникают электроны, обуславливающие кинетическую ИЭЭ.

Необходимо иметь в виду, что при бомбардировке металлической поверхности интенсивным ионным пучком может происходить разогревание материала и зарядка поверхности, если на ней присутствуют диэлектрические пленки или хотя бы «островки» таких пленок. Процессы разогрева и зарядки поверхности приводят к появлению термоэлектронной и полевой электронной эмиссий, которые дополняют и в то же время искажают ИЭЭ.

50. Полевая электронная эмиссия

ПЭЭ (синонимы: автоэлектронная, электростатическая, туннельная эмиссия) – это явление испускания электронов проводящими твердыми и жидкими телами под воздействием внешнего электрического поля E достаточно высокой напряженности ($E \sim 0.1 - 1 \text{ В} \cdot \text{Å}^{-1}$).

Впервые обнаружена в 1899 г. Р.У. Вудом.

Классическая теория оказалась не в состоянии описать ПЭЭ.

Методы квантовой механики впервые были применены к ПЭЭ из металла в 1928 г. Р. Фаулером и Л. Нордгеймом. Они дали теоретическое объяснение ПЭЭ на основе туннельного эффекта.

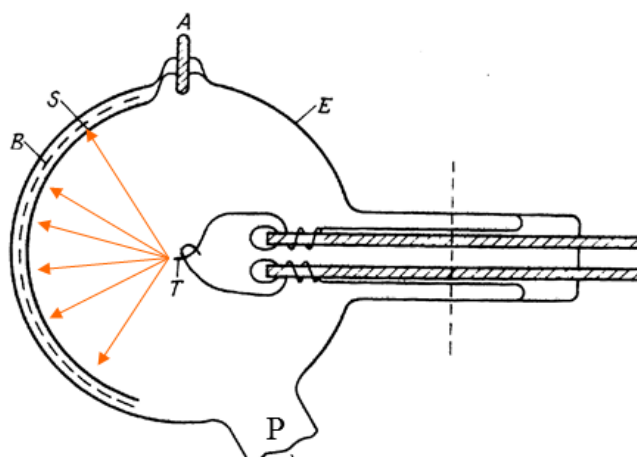


Рисунок 50.1 - Схема простейшего ПЭМ: E – стеклянная колба; S – люминесцентный экран; B – контактное покрытие; A – вакуумный ввод; T – эмиттер (образец - острие); P – патрубок откачки.

Открытие автоэлектронной эмиссии привело к появлению совершенно новой области микро- и нанoeлектроники, так называемой вакуумной микроэлектроники, позволило создать новые фундаментальные методы исследования топологии поверхности с атомным разрешением (сканирующая и просвечивающая электронная микроскопия сверхвысокого разрешения, туннельная микроскопия, электронная голография и др.).

51. Фотоэлектронная эмиссия

ФЭЭ – частный случай известного из вузовского курса общей физики фотоэффекта, а именно, внешний фотоэффект – испускание электронов поверхностями твердых тел под действием электромагнитного излучения в вакуум.

Основные закономерности ФЭЭ:

- 1) количество испускаемых электронов пропорционально интенсивности излучения;
- 2) для каждого вещества при определенном состоянии его поверхности существует порог – минимальная частота ω_0 (или максимальная длина волны λ_0) излучения, за которой ФЭЭ не возникает;
- 3) максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с частотой излучения ω и не зависит от его интенсивности.

ФЭЭ – результат трёх последовательных процессов:

- 1) поглощение фотона и появление в объеме образца электрона с высокой (по сравнению со средней в объеме образца) энергией;
- 2) движения этого электрона к поверхности, при котором часть энергии может рассеяться из-за столкновений с электронами образца;
- 3) выхода электрона через поверхность раздела (преодоление поверхностного барьера).

Количественно ФЭЭ характеризуют квантовым выходом Y

Y – это число вылетевших электронов, приходящихся на один фотон, падающий на поверхность.

Величина Y зависит от:

- свойств твердого тела;
- состояния его поверхности;
- энергии фотонов.

52. Рентгеновское излучение в исследовании поверхности. Закон Мозли

При соударении электронов с атомами вещества возникает два типа рентгеновского излучения: тормозное и характеристическое.

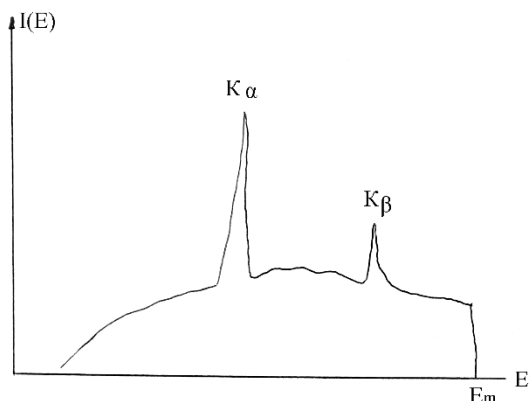


Рисунок 52.1 - Обобщенный энергетический спектр рентгеновского излучения

Тормозное излучение.

• Излучение, возникающее в результате торможения электронов с энергией $eV < E_{\text{ионизации}}$ на поверхности металла, называется тормозным рентгеновским излучением. Здесь eV – энергия электрона, V – ускоряющий потенциал. $E_{\text{ионизации}}$ – энергия ионизации атома.

• Тормозное излучение не зависит от вида металла, на котором происходит торможение электронов, и характеризуется сплошным спектром, ограниченным со стороны коротких волн величиной:

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{eV} = \frac{1,24}{V} \text{ [нм, если } V \text{ в кВ]}$$

• Распределение энергии по спектру описывается выражением:

$$\lambda_{\min} = \frac{B}{\lambda_{\min} \lambda^3} (\lambda - \lambda_{\min})$$

• Любая движущаяся с ускорением частица излучает энергию. Электрон ускоряется в поле ядер атомов и тем самым теряет энергию на излучение. Протон тяжелее и в той же ситуации теряет меньше энергии, чем электрон.

• Спектр сплошной потому, что при торможении заряженная частица (электрон, в частности) может отдать атому при торможении любую, в том числе сколь угодно малую, часть энергии.

Характеристическое излучение.

- Если энергия налетающего на металл первичного электрона удовлетворяет соотношению $eV \geq E_{\text{ионизации}}$, возникает характеристическое излучение: линии накладываются на сплошной спектр.

- Каждый элемент дает только ему присущий линейчатый спектр, не зависимо от того, находится атом в свободном состоянии или в химическом соединении.

- Интенсивность линий в серии убывает от первой линии к границе серии.

- Если энергии налетающего электрона достаточно, чтобы ионизовать К-оболочку (возбудить К-серию), то остальные серии возникают каскадным путем.

- Если энергии налетающего электрона не достаточно, чтобы ионизовать К-оболочку, но достаточно, чтобы ионизовать L-оболочку, то К-серии не возникает, а остальные возникают.

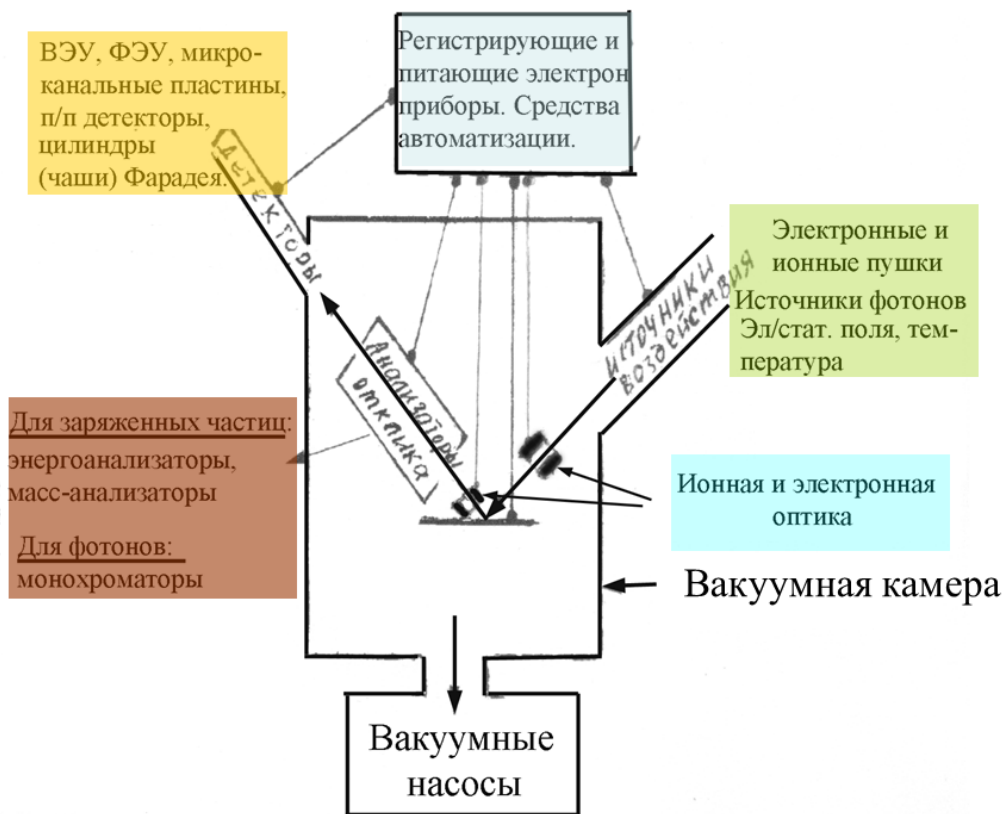
Закон Мозли:

Между частотой ν линий характеристического рентгеновского излучения и атомным номером Z испускающего его элемента справедливо соотношение

$$\sqrt{\nu} = C(Z - \sigma),$$

где C и σ - постоянные величины для данной линии любой серии.

53. Основные экспериментальные особенности и узлы аналитических установок для исследования поверхности



Р

и

Важнейшие инструментальные группы, необходимые для осуществления эксперимента по диагностике поверхности:

- источники воздействия (электронные и ионные пушки или ускорители, источники рентгеновских, ультрафиолетовых и др. γ -квантов).
- анализаторы (энергетические, массовые, монохроматоры).
- детекторы отклика поверхности [цилиндры Фарадея, вторичные электронные и фотоэлектронные умножители (ВЭУ и ФЭУ), микроканальные пластины].
- электронно- и ионно-оптические устройства

—

Б
л
о
к
-
с
х
е
м
а

реализации методов анализа поверхности

II. ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Перечень тем практических занятий

Практическое занятие №1. Построение низкоиндексных кристаллографических структур.

Практическое занятие №2. Определение индексов Миллера.

Практическое занятие №3. Запись Вуда.

Практическое занятие №4. Матричная запись.

Практическое занятие №5. Методы и программы визуализации результатов моделирования поверхности

Практическое занятие №6. Расчет скорости адсорбции

Практическое занятие №7. Расчет скорости десорбции

Практическое занятие №8. Анализ результатов исследования поверхности различными методами

III. КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

1. Вопросы к экзамену по дисциплине «Физика поверхности»

1. Предмет дисциплины. Внутренние и внешние поверхности. Основные факторы, повлиявшие на развитие физики поверхности
2. Основные процессы, связанные с физикой поверхности твердых тел
3. Характерные черты установок для получения СВВ
4. Понятие атомарно-чистой и технологически чистой поверхности и методы получения атомарно чистых поверхностей
5. Элементы симметрии кристаллов. Понятие и обозначение осей симметрии различного порядка, плоскостей и центра симметрии. Их количество в кубической решетке
6. Кристаллографические сингонии. Кристаллическая решетка
7. Двумерные и трехмерные решетки Браве
8. Определение, физический смысл и построение решетки Вигнера-Зейтса. Физический смысл обратной решетки
9. Типы атомной перестройки поверхности – релаксация и реконструкция поверхности. Их виды.
10. Движущие силы реконструкции и релаксации. Механизм образования димеров на кремнии
11. Сложные поверхности монокристаллов. Обозначение ступенчатой поверхности
13. Кристалл Кёсселя. Величина энергии связи атомов в характерных положениях на поверхности.
14. Доля поверхностей раздела и межзеренных границ в консолидированных наноматериалах. Особенности структуры.
15. Влияние размера зерна на общую долю поверхностей раздела, долю межзеренных границ и тройных стыков.
16. Виды и механизмы диффузии. Поверхностная диффузия
17. Объемная диффузия вблизи поверхности. Основные уравнения
18. Диффузия по поверхности отдельного атома и химическая диффузия
19. Поверхностная диффузия кластеров. Коллективный и индивидуальный механизмы
20. Поверхностная структура металлов. Взаимодействие частиц с поверхностью подложки
21. Понятие адсорбат, кромка и суперструктура. Запись структуры поверхности. Матричная запись
23. Электронная структура поверхности. Таммовские состояния и состояния Шокли
24. Поверхностная проводимость. Четырехзондовый метод измерения поверхностного сопротивления.
25. Сопротивление как функция расстояния между зондами. Профили сопротивления
26. Модель ТСИ. Энергия образования адатома и вакансии.

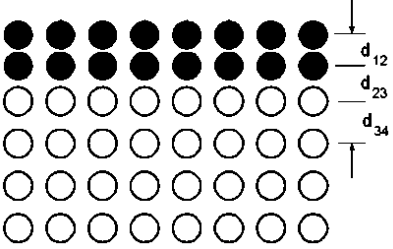
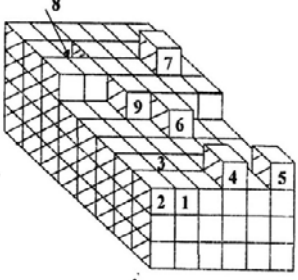
27. Выходы на поверхность краевых и винтовых дислокаций. Сингулярные и вихревые поверхности. Формирование пирамид роста
28. Влияние поверхности на работу полупроводниковых приборов
29. Фасетированные поверхности
30. Пористый кремний. Люминесценция и флюоресценция
31. Понятие адсорбции и сорбции
32. Общие понятия о физической и химической адсорбции
33. Связывание молекул с поверхностью. Стадии взаимодействия молекул с поверхностью
34. Основные характеристики процесса адсорбции
35. Механизмы физической адсорбции
36. Механизмы взаимодействия атомов при физической адсорбции
37. Энергия взаимодействия атома поверхности и молекулы адсорбата при физической и химической адсорбции
38. Основные механизмы хемосорбции на твердых телах (4 случая взаимодействия)
39. Основные теории адсорбции
40. Скорость адсорбции
41. Процессы десорбции. Скорость десорбции
42. Общие представления о методах анализа поверхности
42. Физические явления, лежащие в основе методов диагностики поверхности
43. Ионное распыление и вторичная ионная эмиссия
44. Термо-ионная эмиссия
45. Полевая ионная эмиссия
46. Вторичная электронная эмиссия
47. Оже-электронная эмиссия. Оже-процесс
48. Термо-электронная эмиссия
49. Ионно-электронная эмиссия
50. Полевая электронная эмиссия
51. Фотоэлектронная эмиссия
52. Рентгеновское излучение в исследовании поверхности. Закон Мозли
53. Основные экспериментальные особенности и узлы аналитических установок для исследования поверхности

2. Вопросы с вариантами ответов к тесту по дисциплине «Физика поверхности»

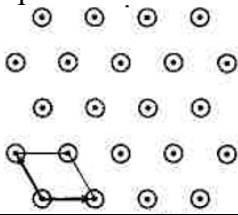
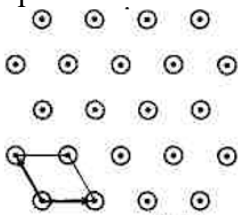
Вариант 1

Инструкция. Тест содержит 20 вопросов. На выполнение варианта отводится 45 минут. К каждому заданию даны 5 вариантов ответа, среди которых только 1 является верным. При выполнении заданий сравните полученный ответ с предложенным. В бланке обведите номер варианта ответа.

№ задания	Задание	Варианты ответов
1	В настоящее время под поверхностью понимается:	1) верхний атомный слой твердого тела 2) верхний слой твердого тела толщиной до 100 нм 3) верхний слой твердого тела толщиной до 200 нм 4) верхний слой твердого тела толщиной до 10 мкм 5) верхний слой твердого тела толщиной до 20 мкм
2	Технологически чистая поверхность – это	1) вицинальная поверхность 2) поверхность, у которой концентрация посторонних атомов меньше концентрации легирующей примеси 3) поверхность, у которой концентрация посторонних атомов выше предела чувствительности используемого метода химического анализа 4) поверхность, которая имеет концентрацию примесей, не препятствующую воспроизводимому получению заданных значений и стабильности параметров, получаемых изделий. 5) поверхность, у которой концентрация посторонних атомов ниже предела чувствительности используемого метода химического анализа
3	Решетка Браве – это...	1) поверхность раздела двух зёрен в поликристаллическом материале 2) это поверхность, у которой один или несколько индексов Миллера ≥ 5 3) это набор элементарных трансляций, которыми может быть получена вся бесконечная кристаллическая решетка. 4) это реальная кристаллическая структура 5) это воображаемая плоскость, которая делит кристалл на две зеркально равные части.
4	На рисунке изображена схема:	1) нормальной релаксации 2) латеральной релаксации 3) консервативной релаксации 4) консервативной реконструкции 5) неконсервативной реконструкции

		
5	<p>На рисунке изображен кристалл Кесселя.</p>  <p>Укажите, какому положению атома соответствует цифра 9:</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) В вершине угла 2) На ступеньке 3) Полукристаллическое положение 4) На полностью заполненном крае 5) На поверхности
6	<p>Диффузия в кристалле это?</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Перенос частиц в кристаллическом твердом теле, обусловленный хаотическим тепловым движением. 2) Это тип атомной перестройки поверхности, при котором атомная структура сохраняется, но расстояние между слоями либо их взаимное расположение изменяется. 3) Это дефект, обусловленный присутствием в структуре посторонних атомов вследствие поверхностной сегрегации 4) Испускание электронов при увеличении температуры. 5) Процесс связанный с перемещением частиц на поверхности твердого тела в пределах первого поверхностного слоя либо по верхнему
7	<p>Область твердого тела вблизи поверхности называют?</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Суперструктура 2) Кромка 3) Грань 4) Слой 5) Адсорбированный слой
8	<p>Чем можно объяснить состояния Шокли?</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Особенности движения электрона на поверхности. 2) Неспаренными связями атомов, находящихся на поверхности. 3) Электронной эмиссией. 4) Особенности квантовой механики. 5) Тепловой диффузией атомов поверхности.

9	<p>На рисунке представлена:</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Сингулярная поверхность 2) Вициальная поверхность, разориентированная в одном направлении 3) Вициальная поверхность, разориентированная в двух направлениях 4) Атомарно чистая поверхность 5) Технологически чистая поверхность
10	<p>В зависимости от продолжительности эмиссии люминесценция делится на следующие виды:</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Флюоресценция и фосфоресценция; 2) Электролюминесценция и катодолуминесценция; 3) Хемилюминесценция и биолуминесценция; 4) Фотолюминесценция и триболуминесценция; 5) Сонолюминесценция и радиолуминесценция.
11	<p>Что не входит в 5 основных стадий процесса взаимодействия молекул с поверхностью?</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Диффузия молекул реагентов к активной поверхности. 2) Адсорбция одной или нескольких молекул на поверхность. 3) Поверхностные реакции. 4) Десорбция продуктов взаимодействия с поверхностью. 5) Электронная эмиссия.
12	<p>Какой механизм физической адсорбции представлен на рисунке</p> 	<p>Неполярная молекула и неполярный адсорбент Полярная молекула и неполярный адсорбент Неполярная молекула и полярный адсорбент Полярная молекула и полярный адсорбент Нет правильного ответа</p>
13	<p>При уменьшении расстояния между молекулами (меньше 2-3 диаметров молекулы) ...</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Между ними возникают силы отталкивания 2) Силы отталкивания исчезают 3) Между ними возникают силы притяжения 4) Силы отталкивания исчезают и молекулы слипаются 5) силы притяжения увеличиваются
14	<p>Какой процесс описывает образование нескольких адсорбционных слоёв?</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Диффузия; 2) Сегрегация; 3) Рекомбинация; 4) Полимолекулярная адсорбция; 5) Абсорбция.
15	<p>Какое условие должно соблюдаться для начала термоэлектронной эмиссии?</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Генерация необходимой концентрации носителей заряда в объеме тела. 2) Приобретение электронами энергии, которая позволит им преодолеть потенциальный барьер.

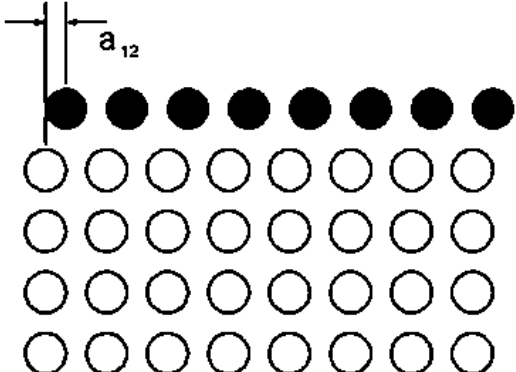
		3) Присутствие определенного количества дислокация в материале. 4) Достижение определенного уровня влажности в воздухе окружающей среды. 5) Достижение определенной доли жидкой фазы в материале
16	Индексы Миллера для плоскости, проходящей через узлы с индексами $[[002]]$, $[[100]]$, $[[030]]$	1) (623) 2) (345) 3) (126) 4) (258) 5) (267)
17	Краткая запись Вуда для данной поверхности 	1) 1x1 2) 1x2 3) 2x1 4) 2x2 5) 3x1
18	Матричная запись для данной поверхности 	1) $\begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix}$ 2) $\begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}$ 3) $\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ 4) $\begin{pmatrix} 0 & 2 \\ 2 & 0 \end{pmatrix}$ 5) $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$
19	Как будет выглядеть полная запись Вуда для адсорбции C_2 на $Si(111) 1x3$	1) $O_2 - Si(111) 2x3$ 2) $O_2 2x3(111) - Si$ 3) $Si(111) 1x3 - C_2$ 4) $O_2(111) 2x3 - Si$ 5) $Si 2x3(111) - O_2$
20	Определить число атомов, приходящихся на одну элементарную ячейку кристалла кальция (ГЦК решетка).	1) 4 2) 7 3) 6 4) 2 5) 1

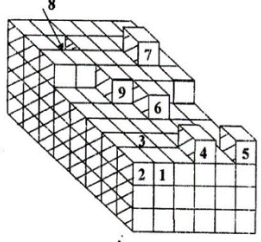
Дата _____

Подпись обучающегося _____

Вариант 2

Инструкция. Тест содержит 20 вопросов. На выполнение варианта отводится 45 минут. К каждому заданию даны 5 вариантов ответа, среди которых только 1 является верным. При выполнении заданий сравните полученный ответ с предложенным. В бланке обведите номер варианта ответа.

№ задания	Задание	Варианты ответов
1	К основным факторам развития физики поверхности не относится:	<ol style="list-style-type: none"> 1) развитие космических исследований 2) развитие теории зонной структуры и химической связи 3) развитие микроэлектроники 4) развитие строительной промышленности 5) возможность достижения сверхвысокого вакуума
2	Полупроводники какого типа расщепляются вдоль плоскости (110)	<ol style="list-style-type: none"> 1) $A_{III}B_V$ 2) $A_{II}B_{VI}$ 3) $A_{VI}B_{VI}$ 4) $A_{II}B_V$ 5) $A_{IV}B_{VI}$
3	Ячейка Вигнера-Зейтса – это...	<ol style="list-style-type: none"> 1) Поверхность раздела двух зёрен в поликристаллическом материале 2) Это поверхность, у которой один или несколько индексов миллера ≥ 5 3) Это набор элементарных трансляций, которыми может быть получена вся бесконечная кристаллическая решетка. 4) Это область пространства с центром в некоторой точке решетки браве, которая лежит ближе к этой точке решетки чем к какой-либо другой точке. 5) Это воображаемая плоскость, которая делит кристалл на две зеркально равные части.
4	<p>На рисунке изображена схема:</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Нормальной релаксации 2) Латеральной релаксации 3) Консервативной релаксации 4) Консервативной реконструкции 5) Неконсервативной реконструкции

5	<p>На рисунке изображен кристалл Кесселя.</p>  <p>Укажите, какому положению атома соответствует цифра 6:</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) В вершине угла 2) На ступеньке 3) Полукристаллическое положение 4) На полностью заполненном крае 5) На поверхности
6	<p>Зернограничная диффузия это?</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Диффузия в твердых поликристаллических телах, сосредоточенная в узких, толщиной в несколько атомных слоёв, зонах на границе зёрен с различной кристаллографической ориентацией. 2) Перенос частиц в кристаллическом твердом теле обусловленный хаотическим тепловым движением. 3) Процесс, связанный с перемещением частиц на поверхности твердого тела в пределах первого поверхностного слоя. 4) Это процесс формирования на поверхности подложки с помощью светочувствительного материала защитного рельефного покрытия. 5) Поглощение какого-либо вещества поверхностным слоем жидкости или твёрдого тела.
7	<p>Атомы, не принадлежащие твердому телу и находящиеся на поверхности это</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Суперструктура 2) Кромка 3) Грань 4) Слой 5) Адсорбированный слой
8	<p>Как называется метод исследования сопротивления поверхности, представленный на следующем рисунке?</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Шестизондовый метод измерения сопротивления. 2) Двухзондовый метод измерения сопротивления. 3) Бесконтактный зондовый метод измерения сопротивления. 4) Четырёхзондовый метод измерения сопротивления. 5) Метод колебательного контура.

9	<p>На рисунке представлена:</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Сингулярная поверхность 2) Вицинальная поверхность, разориентированная в одном направлении 3) Вицинальная поверхность, разориентированная в двух направлениях 4) Атомарно чистая поверхность 5) Технологически чистая поверхность
10	<p>Какая зависимость пористости кремния от времени травления является верной?</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Чем больше продолжительность травления, тем ниже пористость; 2) Чем больше продолжительность травления, тем выше пористость; 3) Продолжительность травления не влияет на пористость; 4) Чем меньше продолжительность травления, тем выше пористость; 5) Чем меньше продолжительность, тем ниже пористость.
11	<p>Назовите верное утверждение</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Физическая адсорбция не диссоциативная и обратимая 2) Физическая адсорбция диссоциативная 3) Физическая адсорбция необратимая 4) Физическая адсорбция диссоциативная и необратимая 5) Физическая адсорбция ограничена одним мономолекулярным слоем
12	<p>Какой механизм физической адсорбции представлен на рисунке</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) неполярная молекула и неполярный адсорбент 2) полярная молекула и неполярный адсорбент 3) неполярная молекула и полярный адсорбент 4) Полярная молекула и полярный адсорбент 5) Нет правильного ответа
13	<p>Явление испускания электронов проводящими твердыми и жидкими</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) эмиссия 2) полевая электронная эмиссия

	<p>талами под воздействием внешнего электрического поля E достаточно высокой напряженности – это:</p>	<p>3) ИЭЭ 4) ТЭЭ 5) Оже-электронная эмиссия</p>
14	<p>Какое из уравнений является уравнением вероятности прилипания?</p>	<p>1) $v_{\text{адс}} = k' P^x$; 2) $v_{\text{адс}} = A \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) P^x$; 3) $S = f(\theta) \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right)$; 4) $v_{\text{адс}} = SF$; 5) $F = \frac{P}{(2\pi m k T)^{\frac{1}{2}}}$.</p>
15	<p>На рисунке представлено ...</p>	<p>1) Схематическая диаграмма потенциальной энергии молекулы 2) График зависимости силы взаимодействия между молекулой и атомом поверхности в зависимости от расстояния между ними 3) Зонные структуры свободного атома 4) Зависимость потенциальной энергии адсорбированного атома 5) Распределение электронной плотности</p>
16	<p>Индексы Миллера для плоскости, проходящей через узлы с индексами $[[001]]$, $[[200]]$, $[[030]]$</p>	<p>1) (623) 2) (326) 3) (126) 4) (258) 5) (267)</p>
17	<p>Краткая запись Вуда для данной поверхности</p>	<p>1) 1x1 2) 2x1 3) 3x1 4) 4x1 5) 5x1</p>
18	<p>Матричная запись для данной поверхности</p>	<p>1) $\begin{pmatrix} 3 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ 2) $\begin{pmatrix} 0 & 3 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ 3) $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 3 \end{pmatrix}$ 4) $\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 3 \end{pmatrix}$ 5) $\begin{pmatrix} 3 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$</p>
19	<p>Как будет выглядеть полная запись Вуда для адсорбции O_2 на $Si(111) 2 \times 3$</p>	<p>1) $O_2 - Si(111) 2 \times 3$ 2) $O_2 2 \times 3(111) - Si$ 3) $Si(111) 2 \times 3 - O_2$ 4) $O_2(111) 2 \times 3 - Si$ 5) $Si 2 \times 3(111) - O_2$</p>

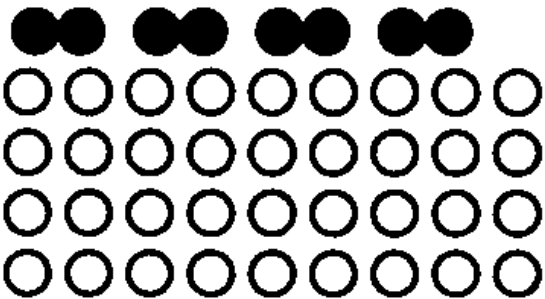
20	Определить число атомов, приходящихся на одну элементарную ячейку кристалла железа (ГЦК решетка).	1) 5 2) 7 3) 6 4) 4 5) 1
----	---	--------------------------------------

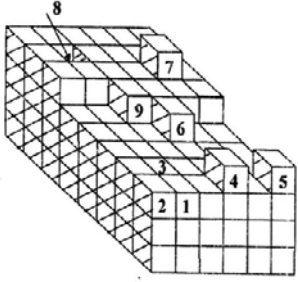
Дата _____

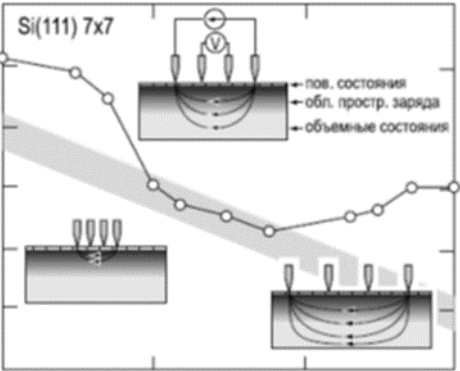
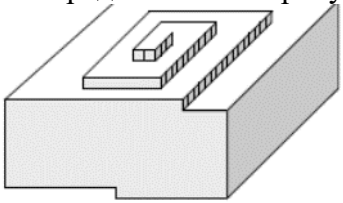
Подпись обучающегося _____

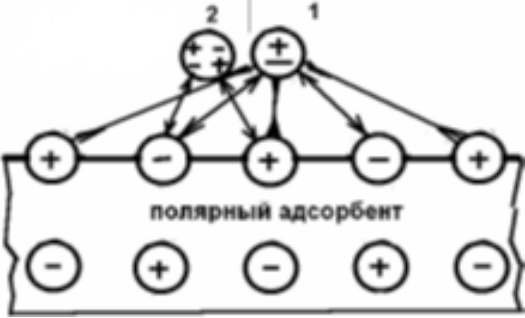
Вариант 3

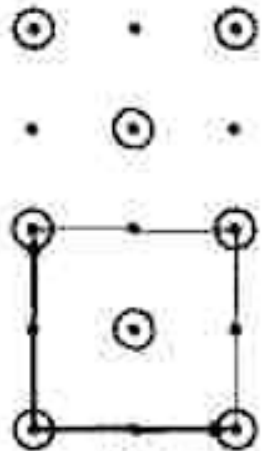
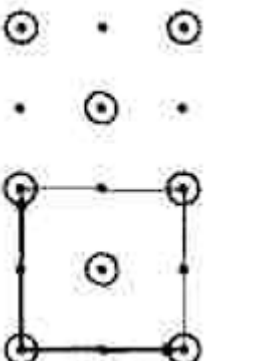
Инструкция. Тест содержит 20 вопросов. На выполнение варианта отводится 45 минут. К каждому заданию даны 5 вариантов ответа, среди которых только 1 является верным. При выполнении заданий сравните полученный ответ с предложенным. В бланке обведите номер варианта ответа.

№ задания	Задание	Варианты ответов
1	Внешние поверхности – это	1) Границы зерен в твердом теле и границы частиц в коллоидных растворах 2) Границы зерен 3) Границы частиц в коллоидных растворах 4) Поверхности твердого тела 5) Поверхности только монокристаллов
2	К способу получения атомарно чистой поверхности не относится:	1) Нагревание в атмосфере 2) Метод скола в атмосфере 3) Нагревание в сверхвысоком вакууме 4) Бомбардировка ионами аргона 5) Формирование пленки исследуемого вещества в сверхвысоком вакууме
3	Высокоиндексная поверхность – это...	1) Поверхность раздела двух зёрен в поликристаллическом материале 2) Это поверхность, у которой один или несколько индексов миллера ≥ 5 3) Это набор элементарных трансляций, которыми может быть получена вся бесконечная кристаллическая решетка. 4) Это область пространства с центром в некоторой точке решетки браве, которая лежит ближе к этой точке решетки чем к какой-либо другой точке. 5) Это воображаемая плоскость, которая делит кристалл на две зеркально равные части.
4	На рисунке изображена схема: 	1) Нормальной релаксации 2) Латеральной релаксации 3) Консервативной релаксации 4) Консервативной реконструкции 5) Неконсервативной реконструкции

5	<p>На рисунке изображен кристалл Кесселя.</p>  <p>Укажите, какому положению атома соответствует цифра 7:</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) В вершине угла 2) На ступеньке 3) Полукристаллическое положение 4) На полностью заполненном крае 5) На поверхности
6	<p>Поверхностная диффузия это?</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Процесс, связанный с перемещением частиц на поверхности твердого тела в пределах первого поверхностного слоя либо по верхнему. 2) Процесс формирования на поверхности подложки с помощью светочувствительного материала защитного рельефного покрытия с изображением элементов схемы и последующего переноса изображения на подложку. 3) Перенос частиц в кристаллическом твердом теле обусловленный хаотическим тепловым движением. 4) Поглощение какого-либо вещества из газообразной среды или раствора поверхностным слоем жидкости или твердого тела. 5) Диффузия в твердых поликристаллических телах, сосредоточенная в узких, толщиной в несколько атомных слоёв, зонах на границе зёрен с различной кристаллографической ориентацией.
7	<p>Суперструктура это</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Сильно упорядоченная структура 2) Кромка 3) Кромка+ Адсорбированный слой 4) Слой 5) Адсорбированный слой

8	<p>Зависимость между какими величинами представлена на следующем рисунке?</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1) 1). Сопротивления от расстояния между зондами. 2) Удельной проводимости от площади поверхности. 3) Сопротивления от количества зондов. 4) Расстояния между зондами от кристаллографической ориентации. 5) Сопротивления от размера образца.
9	<p>Что представлено на рисунке?</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Процесс кристаллизации висмута 2) Процесс обработки поверхности тонкого материала на станке. 3) Формирование пирамиды роста вокруг точки выхода винтовой дислокации. 4) Процесс навивки нового плёночного слоя на чистой поверхности. 5) Типы дислокаций на поверхности кристалла.
10	<p>Сорбция – это</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Поглощение твёрдым телом или жидкостью вещества из окружающей среды 2) Поглощение вещества всей массой жидкого сорбента 3) Поглощение вещества поверхностным слоем твёрдого или жидкого сорбента 4) Процесс переноса вещества 5) Процесс поглощения жидкости
11	<p>Химическая адсорбция:</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Не диссоциативная и обратимая 2) Недиссоциативная 3) Обратимая 4) Диссоциативная и необратимая 5) Происходит около точки конденсации газа

12	<p>Какой механизм физической адсорбции представлен на рисунке</p>  <p>полярный адсорбент</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) неполярная молекула и неполярный адсорбент 2) полярная молекула и неполярный адсорбент 3) неполярная молекула и полярный адсорбент 4) полярная молекула и полярный адсорбент 5) Нет правильного ответа
13	<p>Выберите правильное утверждение:</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Хемосорбция имеет более глубокий минимум потенциальной энергии, чем физическая адсорбция. 2) Физическая адсорбция имеет более глубокий минимум потенциальной энергии, чем хемосорбция. 3) Минимумы потенциальной энергии физической и химической адсорбции равны 4) Хемосорбция не имеет минимума потенциальной энергии. 5) Физическая адсорбция не имеет минимума потенциальной энергии.
14	<p>Какое из уравнений является уравнением Герца-Кнудсена?</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) $v_{\text{адс}} = k'P^x$; 2) $v_{\text{адс}} = A \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) P^x$; 3) $S = f(\theta) \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right)$; 4) $v_{\text{адс}} = SF$; 5) $F = \frac{P}{(2\pi mkt)^{\frac{1}{2}}}$.
15	<p>Число вылетевших электронов, приходящихся на один фотон, падающий на поверхность – это:</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Интенсивность излучения 2) Максимальная кинетическая энергия 3) ФЭЭ 4) Потенциальная энергия 5) Квантовый выход
16	<p>Индексы Миллера для плоскости, проходящей через узлы с индексами [[002]], [[200]], [[040]]</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) (623) 2) (345) 3) (212) 4) (258) 5) (267)

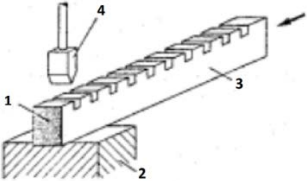
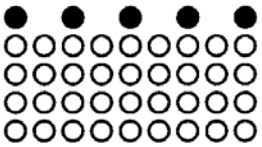
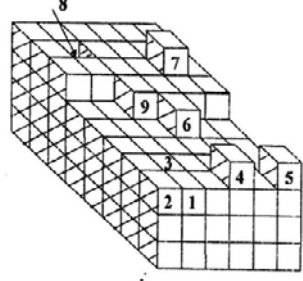
17	<p>Краткая запись Вуда для данной поверхности</p> 	<p>1) 1x1 2) 2x2 3) 3x3 4) 1x2 5) 2x1</p>
18	<p>Матричная запись для данной поверхности</p> 	<p>1) $\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$ 2) $\begin{pmatrix} 0 & 3 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ 3) $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 3 \end{pmatrix}$ 4) $\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 3 \end{pmatrix}$ 5) $\begin{pmatrix} 3 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$</p>
19	<p>Как будет выглядеть полная запись Вуда для адсорбции O_2 на Si (123) 2x3</p>	<p>1) $O_2 - Si$ (111) 2x3 2) O_2 2x3 (111) - Si 3) Si (123) 2x3 - O_2 4) O_2 (111) 2x3 - Si 5) Si 2x3 (111) - O_2</p>
20	<p>Определить число атомов, приходящихся на одну элементарную ячейку кристалла алюминия (ГЦК решетка).</p>	<p>1) 4 2) 7 3) 6 4) 2 5) 1</p>

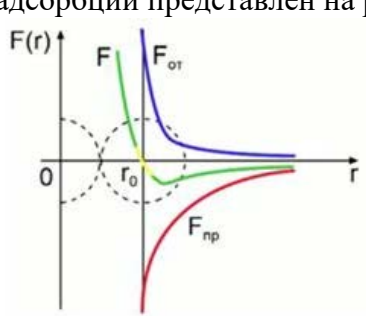
Дата _____

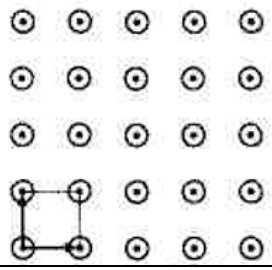
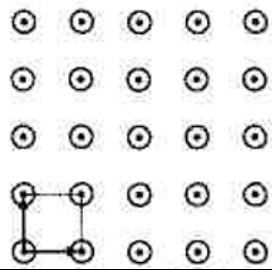
Подпись обучающегося _____

Вариант 4

Инструкция. Тест содержит 20 вопросов. На выполнение варианта отводится 45 минут. К каждому заданию даны 5 вариантов ответа, среди которых только 1 является верным. При выполнении заданий сравните полученный ответ с предложенным. В бланке обведите номер варианта ответа.

№ задания	Задание	Варианты ответов
1	Внутренние поверхности – это	1) Границы зерен в твердом теле и границы частиц в коллоидных растворах. 2) Границы зерен. 3) Границы частиц в коллоидных растворах 4) Поверхности твердого тела 5) Поверхности жидкостей
2	На рисунке под номером 1 изображен: 	1) клин 2) подложка 3) образец 4) скол 5) упор
3	Из нижеперечисленных выберите двумерную решетку Браве.	1) гранецентрированная 2) примитивная 3) квадратная 4) база-центрированная 5) объемно-центрированная
4	На рисунке изображена схема: 	1) нормальной релаксации 2) латеральной релаксации 3) консервативной релаксации 4) консервативной реконструкции 5) неконсервативной реконструкции
5	 <p>Выберите верный порядок, который соответствует уменьшению энергии связи в характерных положениях:</p>	1) $E_1 > E_2 > E_3 > E_4 > E_5 > E_6 > E_7 > E_8 > E_9$ 2) $E_9 > E_8 > E_7 > E_6 > E_5 > E_4 > E_3 > E_2 > E_1$ 3) $E_1 > E_2 > E_3 > E_4 > E_6 > E_8 > E_9 > E_5 > E_7$ 4) $E_8 > E_3 > E_1 > E_9 > E_2 > E_6 > E_7 > E_4 > E_5$ 5) $E_9 > E_8 > E_7 > E_6 > E_4 > E_2 > E_5 > E_3 > E_1$
6	Назовите механизмы диффузии в кристалле.	1) Диффузия в кристалле. 2) Зернограничная диффузия. 3) Поверхностная диффузия. 4) У всех одинаковая скорость. 5) Диффузия в кристалле и зернограничная.

7	Виды записи суперструктуры	<ol style="list-style-type: none"> 1) Матричная запись и завись Вуда 2) Таммовские и Шокли 3) Диффузионные 4) Сингулярные 5) Модели ТСИ
8	Факторы, который необходимо учитывать при использовании четырёхзондового метода измерения сопротивления.	<ol style="list-style-type: none"> 1) Диэлектрическую проницаемость материала исследования. 2) Материал образца 3) Расстояние между зондами и размер образца. 4) Только размер зондов. 5) Только расстояние между зондами.
9	Что собой представляет фасетирование поверхности?	<ol style="list-style-type: none"> 1) Образование нового слоя; 2) Образование упорядоченных «холмов» и «канавок»; 3) Образование упорядоченного «рисунка» на поверхности; 4) Удаление верхнего слоя атомов; 5) Упорядочивание дислокаций на поверхности.
10	Абсорбция – это	<ol style="list-style-type: none"> 1) Поглощение твёрдым телом или жидкостью вещества из окружающей среды 2) Поглощение вещества всей массой сорбента 3) Поглощение вещества поверхностным слоем твёрдого или жидкого сорбента 4) Процесс переноса вещества 5) Процесс поглощения жидкости
11	Интервал температур, в котором происходит физическая адсорбция	<ol style="list-style-type: none"> 1) Около или ниже точки конденсации газа 2) Фактически неограниченный 3) Минусовые температуры 4) ≥ 300 К 5) Не имеет значения
12	Какой механизм физической адсорбции представлен на рисунке 	<ol style="list-style-type: none"> 1) неполярная молекула и неполярный адсорбент 2) Полярная молекула и неполярный адсорбент 3) неполярная молекула и полярный адсорбент 4) Полярная молекула и полярный адсорбент 5) Нет правильного ответа
13	Какой эффект объясняет механизм, при котором валентный электрон атома может занять свободный энергетический уровень металла, преодолев потенциальный барьер?	<ol style="list-style-type: none"> 1) Скин-эффект; 2) Эффект Заебека; 3) Эффект Кориолиса; 4) Эффект Холла; 5) Туннельный эффект.

14	Какое из уравнений является уравнением Аррениуса?	1) $v_{\text{адс}} = k' P^x$; 2) $v_{\text{адс}} = A \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) P^x$; 3) $S = f(\theta) \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right)$; 4) $v_{\text{адс}} = SF$; 5) $F = \frac{P}{(2\pi m k T)^{\frac{1}{2}}}$.
15	Сколько типов рентгеновского излучения возникает при соударении электронов с атомами вещества:	1) 1 2) 2 3) 3 4) 4 5) 5
16	Индексы Миллера для плоскости, проходящей через узлы с индексами $[[002]]$, $[[300]]$, $[[010]]$	1) (623) 2) (345) 3) (126) 4) (263) 5) (267)
17	Краткая запись Вуда для данной поверхности 	1) 1x1 2) 1x2 3) 2x1 4) 2x2 5) 3x1
18	Матричная запись для данной поверхности 	1) $\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$ 2) $\begin{pmatrix} 0 & 3 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ 3) $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ 4) $\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 3 \end{pmatrix}$ 5) $\begin{pmatrix} 3 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$
19	Как будет выглядеть полная запись Вуда для адсорбции C_2 на $Si(111) 1 \times 4$	1) $O_2 - Si(111) 2 \times 3$ 2) $O_2 2 \times 3(111) - Si$ 3) $Si(111) 1 \times 4 - C_2$ 4) $O_2(111) 2 \times 3 - Si$ 5) $Si 2 \times 3(111) - O_2$
20	Определить число атомов, приходящихся на одну элементарную ячейку кристалла меди (ГЦК решетка).	1) 2 2) 7 3) 6 4) 4 5) 1

Дата _____

Подпись обучающегося _____

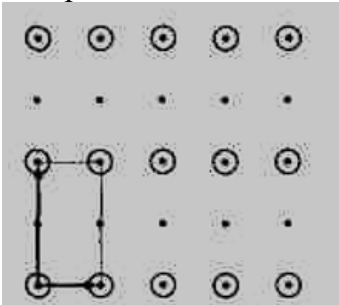
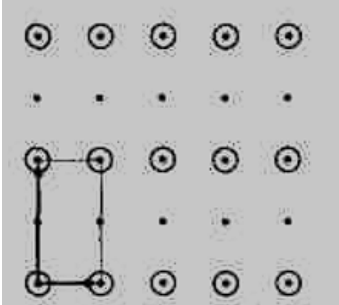
Вариант 5

Инструкция. Тест содержит 20 вопросов. На выполнение варианта отводится 45 минут. К каждому заданию даны 5 вариантов ответа, среди которых только 1 является верным. При выполнении заданий сравните полученный ответ с предложенным. В бланке обведите номер варианта ответа.

№ задания	Задание	Варианты ответов
1	Хрупкий излом – ...	1) Это явление, при котором материалы стойки к сильным нагрузкам, но при резком воздействии на материал гораздо меньшей нагрузки они легко разрушаются. 2) Это явление, при котором материалы стойки к слабым нагрузкам, но при резком воздействии на материал гораздо большей нагрузки они легко разрушаются. 3) Это явление, возникающее при возникновении слабой нагрузки на материал, которая в следствие приводит к его деформации 4) Это явление, возникающее при возникновении сильной нагрузки на материал, которая в следствие приводит к его деформации 5) Это явление, возникающее при воздействии нагрузкой, превышающей технические параметры материала, в следствие чего материал деформируется
2	Плоскость симметрии – это...	1) Поверхность раздела двух <u>зёрен</u> в поликристаллическом материале 2) Это воображаемая плоскость, которая делит кристалл на две зеркально равные части 3) Это условная точка внутри кристалла, расположенная на равных расстояниях от элементов ограничения кристалла. 4) Это поверхность, которая содержит прямые, соединяющие две любые ее точки 5) Это чистая на атомном уровне поверхность
3	Сколько всего различают трехмерных решеток Браве?	1) 21 2) 23 3) 7 4) 3 5) 14
4	Выберите правильную запись обозначения ступенчатой поверхности:	1) S-[@(hkl)+(hkl)] 2) C-[@(hkl)-(hkl)] 3) Z-[@(hkl)+(hkl)] 4) S- (hkl) 5) S-[@(hkl)-(hkl) ²]

5	Какие поверхности раздела характерны для структуры наноматериалов?	<ol style="list-style-type: none"> 1) Межзеренные границы и тройные стыки. 2) Адсорбированные атомы . 3) Межзеренные углы. 4) Дислокации. 5) Наночастицы.
6	Какая диффузия протекает быстрее?	<ol style="list-style-type: none"> 1) Диффузия в кристалле. 2) Зернограничная диффузия. 3) Поверхностная диффузия. 4) У всех одинаковая скорость. 5) Диффузия в кристалле и зернограничная.
7	Матричная запись заключается в определении	<ol style="list-style-type: none"> 1) Соотношения длин векторов примитивных трансляций суперструктуры и плоскости подложки 2) Угла, на который следует повернуть элементарную ячейку поверхности, чтобы ее оси совместились с векторами примитивных трансляций подложки 3) Размера наночастиц 4) Размера микрочастиц 5) Матрицы, которая устанавливает связь между векторами примитивных т р а
8	Как расшифровывается аббревиатура в термине «модель ТСИ?»	<ol style="list-style-type: none"> 1) Образование нового слоя; 2) Образование упорядоченных «холмов» и «канавок»; 3) Образование упорядоченного «рисунка» на поверхности; 4) Удаление верхнего слоя атомов; 5) Упорядочивание дислокаций на поверхности.
9	К чему приводит фасетирование поверхности?	<ol style="list-style-type: none"> 1) Уменьшение полной свободно энергии, и увеличение её полной площади поверхности; 2) Увеличение полной свободно энергии, и уменьшение её полной площади поверхности; 3) Уменьшение полной свободно энергии, и уменьшение её полной площади поверхности; 4) Увеличение полной свободно энергии, и увеличение её полной площади поверхности; 5) Ни к чему не приводит

10	Адсорбция – это	<ol style="list-style-type: none"> 1) Поглощение твёрдым телом или жидкостью вещества из окружающей среды 2) Поглощение вещества всей массой сорбента 3) Поглощение вещества поверхностным слоем твёрдого или жидкого сорбента 4) Процесс переноса вещества 5) Процесс поглощения жидкости
11	Интервал температур, в котором происходит химическая адсорбция	<ol style="list-style-type: none"> 1) Около или ниже точки конденсации газа 2) Фактически неограниченный (конкретная молекула эффективно адсорбируется в узком интервале T) 3) минусовые температуры 4) ≥ 300 K 5) ≥ 200 K
12	Выберите механизм, по которому может осуществляться физическая адсорбция.	<ol style="list-style-type: none"> 1) неполярная молекула и неполярный адсорбент 2) Полярная молекула и неполярный адсорбент 3) неполярная молекула и полярный адсорбент 4) Полярная молекула и полярный адсорбент 5) Она может осуществляться по всем вышеперечисленным механизмам
13	<p>На рисунке представлены</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Зонные структуры 1 – металла; 2 – адатома; 3 – свободного атома 2) Зонные структуры 1 – адатома, 2 – металла; 3 – свободного атома 3) Зонные структуры 1 – свободного атома 2 – металла; 3 – адатома 4) Зависимость энергии от расстояния атома до поверхности 5) Схема физической адсорбции
14	Элементарным шагом простой молекулярной десорбции является.	<ol style="list-style-type: none"> 1) Разрыв связи атома или молекулы с поверхностью. 2) Образование молекул на поверхности адсорбента из осаждённых атомов. 3) Переход атомов с поверхности в объём адсорбента. 4) Образование связей между атомами адсорбата. 5) Разрушение молекул адсорбата на поверхности.
15	Выберите верное неравенство для тормозного рентгеновского излучения:	<ol style="list-style-type: none"> 1) $eV > E_{\text{ионизации}}$ 2) $eV = E_{\text{ионизации}}$ 3) $eV < E_{\text{ионизации}}$ 4) $eV \geq E_{\text{ионизации}}$ 5) $eV \leq E_{\text{ионизации}}$

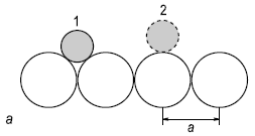
16	Индексы Миллера для плоскости, проходящей через узлы с индексами $[[003]]$, $[[100]]$, $[[060]]$	1) (623) 2) (345) 3) (126) 4) (258) 5) (612)
17	Краткая запись Вуда для данной поверхности 	1) 1x1 2) 1x2 3) 2x1 4) 2x2 5) 3x1
18	Матричная запись для данной поверхности 	1) $\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$ 2) $\begin{pmatrix} 0 & 3 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ 3) $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}$ 4) $\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 3 \end{pmatrix}$ 5) $\begin{pmatrix} 3 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$
19	Как будет выглядеть полная запись Вуда для адсорбции C_2 на $Si(111) 3 \times 3$	1) $O_2 - Si(111) 2 \times 3$ 2) $O_2 2 \times 3 (111) - Si$ 3) $Si(111) 3 \times 3 - C_2$ 4) $O_2 (111) 2 \times 3 - Si$ 5) $Si 2 \times 3 (111) - O_2$
20	Определить число атомов, приходящихся на одну элементарную ячейку кристалла никеля (ГЦК решетка).	1) 2 2) 7 3) 6 4) 4 5) 1


Дата _____

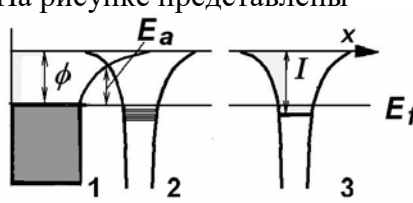
Подпись обучающегося _____

Вариант 6

Инструкция. Тест содержит 20 вопросов. На выполнение варианта отводится 45 минут. К каждому заданию даны 5 вариантов ответа, среди которых только 1 является верным. При выполнении заданий сравните полученный ответ с предложенным. В бланке обведите номер варианта ответа.

№ задания	Задание	Варианты ответов
1	Термоэлектронная эмиссия – испускание электронов при	1) При уменьшении температуры 2) При увеличении температуры 3) При постоянной температуре 4) При равновесной температуре 5) При неравновесной температуре
2	Центр симметрии – это...	1) Это набор элементарных трансляций, которыми может быть получена вся бесконечная кристаллическая решетка. 2) Это место, не имеющее измерения, граница отрезка линии. 3) Точка кристаллической решетки, в которой расположены атомы и ионы 4) Это условная точка внутри кристалла, расположенная на равных расстояниях от элементов ограничения кристалла. 5) Это точка, в которой происходит рекомбинация носителей заряда
3	Сколько всего двумерных решеток Браве?	1) 13 2) 2 3) 15 4) 5 5) 9
4	Вставьте пропущенное слово. Для описания реальных поверхностей вводят понятие физической, химической и ... неоднородности.	1) Биохимической 2) Адсорбированной 3) Десорбированной 4) Структурной 5) Индуцированной
5	Межзеренная граница - это	1) Граница зерен кристалла с внешней средой. 2) Поверхность раздела двух зёрен в поликристаллическом материале. 3) Граница зерен с дефектами поверхности. 4) Граница зерен с адсорбатом. 5) Непосредственно поверхности твердого тела, а также p-n переходы.
6	На рисунке представлено следующее положение адсорбированных атомов на поверхности: 	1) В адсорбционном положении и в седловой точке. 2) В узлах решетки. 3) В составе составов газов или жидкостей. 4) В межзеренной границе. 5) В дефектах поверхностей и пленок.

7	<p>На рисунке представлен следующий механизм перемещения кластеров</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Последовательное перемещение 2) Переползание 3) Испарение-конденсация 4) «Чехарда» 5) Краевая диффузия
8	<p>Какой смысл имеет модель ТСИ?</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Показывает типичные атомные положения и дефекты на поверхности. 2) Показывает возможности возникновения дефектов на поверхности. 3) Представляет идеальную структуру поверхности и взаимодействия на ней. 4) Моделирует общие условия для образования адатомов на поверхности материала. 5) Показывает, сколько атомов и вакансий может возникнуть на материале, при нормальных условиях.
9	<p>На каких поверхностях наблюдаются фасетированные структуры?</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) С малыми индексами Миллера до 5; 2) Только с индексами Миллера (111); 3) Только с индексом Миллера (100); 4) В низко-индексных поверхностях; 5) В высоко-индексных поверхностях с индексами Миллера ≥ 5.
10	<p>Определение экспозиции.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Твердая поверхность, на которую осуществляется адсорбция; 2) Это произведение давления на время выдержки в среде; 3) Адсорбированное вещество; 4) Мера величины адсорбции – количество атомов или молекул на поверхности; 5) Поглощение твёрдым телом или жидкостью вещества из окружающей среды.
11	<p>Какая из представленных характеристик не относится к химической адсорбции?</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Имеет диссоциативную и необратимую природу адсорбции 2) Кинетика адсорбции переменная и активированная 3) Интервал температур, в котором происходит адсорбция фактически неограничен (конкретная молекула эффективно адсорбируется в узком интервале T) 4) Энергия адсорбции слабо зависит от атомной геометрии поверхности 5) Энтальпия адсорбции изменяется в широких пределах, соответствующих прочности химической связи - 40-800 кДж/моль

12	Графит и алмаз являются...?	<ol style="list-style-type: none"> 1) Полярными адсорбентами 2) Могут быть и полярными и неполярными адсорбентами 3) Неполярными адсорбентами 4) Полярными молекулами 5) Их полярность зависит от температуры на поверхности вещества
13	<p>На рисунке представлены</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Зонные структуры 1 – металла; 2 – атома; 3 – свободного атома 2) Зонные структуры 1 – атома, 2 – металла; 3 – свободного атома 3) Зонные структуры 1 – свободного атома 2 – металла; 3 – атома 4) Зависимость энергии от расстояния атома до поверхности 5) Схема физической адсорбции
14	Параметром отклика в ионной спектроскопии является:	<ol style="list-style-type: none"> 1) Интенсивность энергетических спектров вторичных электронов, ионов. 2) Форма энергетических спектров фотонов. 3) Состав и интенсивность массовых линий в спектрах масс вторичных ионов. 4) Температура изучаемого образца. 5) Форма массовых линий в спектрах масс электронов
15	Выберите верное неравенство для характеристического рентгеновского излучения:	<ol style="list-style-type: none"> 1) $eV > E_{\text{ионизации}}$ 2) $eV = E_{\text{ионизации}}$ 3) $eV < E_{\text{ионизации}}$ 4) $eV \geq E_{\text{ионизации}}$ 5) $eV \leq E_{\text{ионизации}}$
16	Индексы Миллера для плоскости, проходящей через узлы с индексами $[[004]]$, $[[100]]$, $[[080]]$	<ol style="list-style-type: none"> 1) (812) 2) (345) 3) (126) 4) (258) 5) (267)
17	Краткая запись Вуда для данной поверхности	<ol style="list-style-type: none"> 1) 1x1 2) $\sqrt{2} \times \sqrt{2} R45^\circ$ 3) 2x1 4) 2x2 5) 3x1

18	<p>Матричная запись для данной поверхности</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) $\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$ 2) $\begin{pmatrix} 0 & 3 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ 3) $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}$ 4) $\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 3 \end{pmatrix}$ 5) $\begin{pmatrix} 3 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$
19	<p>Как будет выглядеть полная запись Вуда для адсорбции C_2 на $Si (101) 1 \times 3$</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) $O_2 - Si (111) 2 \times 3$ 2) $O_2 2 \times 3 (111) - Si$ 3) $Si (101) 1 \times 3 - C_2$ 4) $O_2 (111) 2 \times 3 - Si$ 5) $Si 2 \times 3 (111) - O_2$
20	<p>Определить число атомов, приходящихся на одну элементарную ячейку кристалла свинца (ГЦК решетка).</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) 2 2) 7 3) 6 4) 4 5) 1

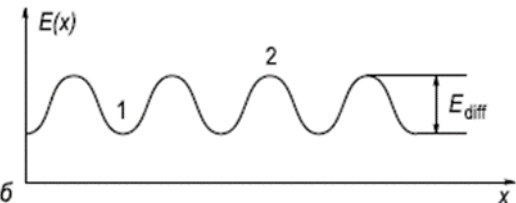
Дата _____


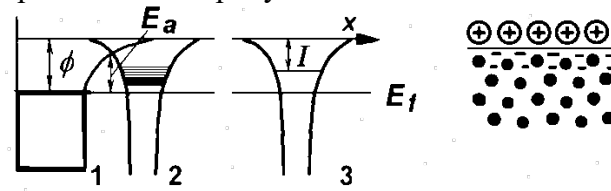
Подпись обучающегося _____

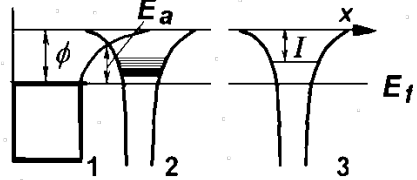
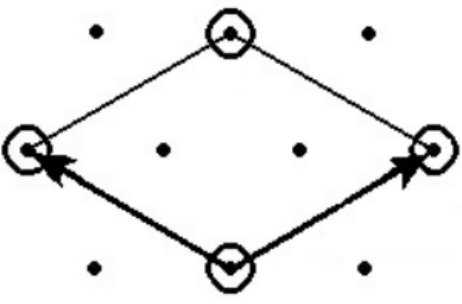
Вариант 7

Инструкция. Тест содержит 20 вопросов. На выполнение варианта отводится 45 минут. К каждому заданию даны 5 вариантов ответа, среди которых только 1 является верным. При выполнении заданий сравните полученный ответ с предложенным. В бланке обведите номер варианта ответа.

№ задания	Задание	Варианты ответов
1	Катализ –	1) замедление протекания химической реакции в присутствии вещества катализатора, которые взаимодействует с реагентами, но в реакции не расходуется и не входит в состав конечных продуктов 2) ускорение химической реакции в присутствии вещества катализатора, который взаимодействует с реагентами, но в реакции не расходуется и не входит в состав конечных продуктов 3) ускорение химической реакции без катализатора 4) ускорение протекания химической реакции в присутствии вещества ингибитора, которые взаимодействует с реагентами, но в реакции не расходуется и не входит в состав конечных продуктов 5) ускорение химической реакции в присутствии вещества катализатора, который взаимодействует с реагентами, расходуется в реакции и входит в конечный состав продукта
2	Выберите сингонию, которой соответствует следующая характеристика: $a = b = c;$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	1) ромбическая 2) прямоугольная 3) кубическая 4) гексагональная 5) триклинная
3	Сколько всего существует сингоний?	1) 4 2) 11 3) 1 4) 15 5) 7

4.	Физическая неоднородность:	<p>1) Включает в себя неровности поверхности различной природы и отклонение структуры поверхности от структуры идеального кристалла.</p> <p>2) Это дефект, обусловленный присутствием в структуре посторонних атомов вследствие поверхностной сегрегации.</p> <p>3) Это неоднородность, вызванная процессами адсорбции остаточных газов.</p> <p>4) Включает в себя абсолютно ровную поверхность, которая не отличается от идеального кристалла идентичной решетки Бравэ.</p> <p>5) Это неоднородность, вызванная процессами десорбции остаточных газов</p>
5.	Тройной стык – это	<p>1) Граница зерен кристалла с внешней средой.</p> <p>2) Поверхность раздела двух зёрен в поликристаллическом материале.</p> <p>3) Граница зерен с дефектами поверхности.</p> <p>4) Поверхность раздела трех зёрен в поликристаллическом материале.</p> <p>5) Непосредственно поверхности твердого тела, а также p-n переходы.</p>
6.	<p>На рисунке представлена</p> 	<p>1). Зависимость потенциальной энергии от положения атома вдоль поверхности.</p> <p>2) Зависимость потенциальной энергии от расстояния атома от поверхности</p> <p>3) Зависимость кинетической энергии от положения атома вдоль поверхности.</p> <p>4) Зависимость кинетической энергии от расстояния атома от поверхности.</p> <p>5) Зависимость силы притяжения от расстояния атома от поверхности.</p>

7.	<p>На рисунке представлен следующий механизм перемещения кластеров</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Последовательное перемещение 2) Переползание 3) Испарение-конденсация 4) «Чехарда» 5) Краевая диффузия
8.	<p>Какая поверхность называется сингулярной?</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) С небольшим количеством неоднородностей. 2) Атомарно чистая. 3) Химически чистая. 4) Технологически чистая. 5) Атомарно гладкая
9.	<p>Какова причина спонтанного фазетирования поверхности?</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) большая удельная поверхностная энергия; 2) малая удельная поверхностная энергия; 3) стремление поверхности к большей удельной поверхностной энергии; 4) зависимость упругой энергии релаксации от её ориентации относительно кристаллографических осей; 5) малая свободная энергия.
10.	<p>Единица измерения экспозиции.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) 1 Паскаль; 2) 1 Ньютон; 3) 1 моль; 4) 1 КДж/моль; 5) 1 Ленгмюр.
11	<p>Что относится к основным характеристикам, определяющим процесс адсорбции?</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) температура 2) кристаллическая структура поверхности 3) насыщенность поверхности адсорбатом 4) энергетические характеристики процесса 5) все вышеперечисленные характеристики
12	<p>Какой механизм химической адсорбции представлен на рисунке</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1) неполярная молекула и неполярный адсорбент 2) полярная молекула и неполярный адсорбент 3) неполярная молекула и полярный адсорбент 4) полярная молекула и полярный адсорбент 5) нет правильного ответа

13	<p>На рисунке представлены</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Зонные структуры 1 – металла; 2 – атома; 3 – свободного атома 2) Зонные структуры 1 – атома, 2 – металла; 3 – свободного атома 3) Зонные структуры 1 – свободного атома 2 – металла; 3 – атома 4) Зависимость энергии от расстояния атома до поверхности 5) Схема физической адсорбции
14	<p>Что такое ионно-электронная эмиссия?</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1). Испускание ионов твердым телом при бомбардировке электронами. 2). Испускание электронов твердым телом при бомбардировке ионами. 3). Испускание электронов твердым телом под воздействием β-излучения. 4). Испускание ионов твердым телом при его нагреве. 5). Рекомбинация ионов и электронов на поверхности твердого тела без испускания частиц.
15	<p>Чем характеризуется тормозное рентгеновское излучение:</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) видом металла 2) сплошным спектром 3) длиной волны 4) диапазоном температур 5) агрегатным состоянием
16	<p>Индексы Миллера для плоскости, проходящей через узлы с индексами $[[003]]$, $[[200]]$, $[[010]]$</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) (623) 2) (362) 3) (126) 4) (258) 5) (267)
17	<p>Краткая запись Вуда для данной поверхности</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1) 1x1 2) $\sqrt{3} \times \sqrt{3} R30^\circ$ 3) 2x1 4) 2x2 5) 3x1

18	<p>Матричная запись для данной поверхности</p> 	1) $\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$ 2) $\begin{pmatrix} 0 & 3 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ 3) $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}$ 4) $\begin{pmatrix} 2 & 1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$ 5) $\begin{pmatrix} 3 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$
19	<p>Как будет выглядеть полная запись Вуда для адсорбции O₂ на Si (122) 1x3</p>	1) O ₂ - Si (111) 2x3 2) O ₂ 2x3 (111) - Si 3) Si (122) 1x3 - O ₂ 4) O ₂ (111) 2x3 - Si 5) Si 2x3 (111) - O ₂
20	<p>Определить число атомов, приходящихся на одну элементарную ячейку кристалла хрома (ОЦК решетка).</p>	1) 1 2) 2 3) 4 4) 6 5) 14

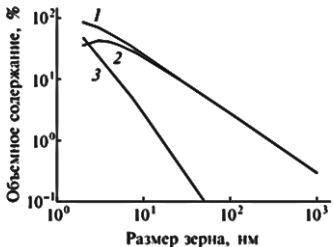
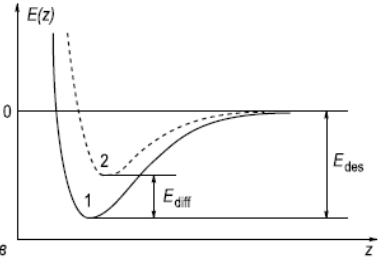
Дата _____


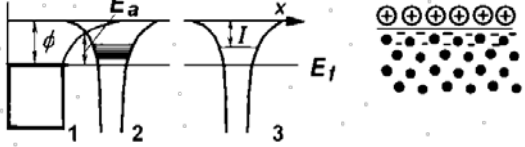
Подпись обучающегося _____

Вариант 8

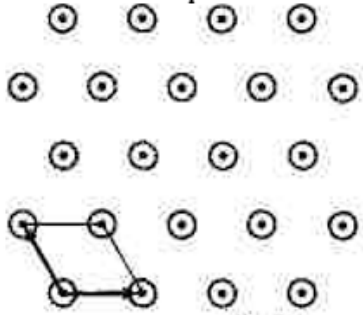
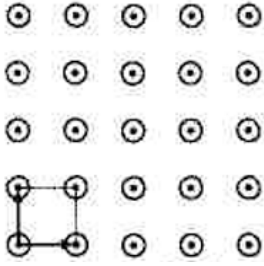
Инструкция. Тест содержит 20 вопросов. На выполнение варианта отводится 45 минут. К каждому заданию даны 5 вариантов ответа, среди которых только 1 является верным. При выполнении заданий сравните полученный ответ с предложенным. В бланке обведите номер варианта ответа.

№ задания	Задание	Варианты ответов
1	В СВВ установках вакуумная камера и отходящая от нее система трубопроводов обычно изготавливаются из ...	1) бронзовые сплавы 2) медно-никелевый сплав 3) нержавеющей стали 4) латунные сплавы 5) чугунные сплавы
2	Реконструкция – это...	1) тип атомной перестройки поверхности, в результате которой атомная структура поверхностных слоев существенно отличается от объемной структуры кристаллов 2) тип атомной перестройки поверхности, в результате которой атомная структура поверхностных слоев не изменяется, но изменяется расстояние между ними 3) самопроизвольный процесс увеличения концентрации растворенного вещества у поверхности раздела двух фаз 4) исчезновение пары свободных носителей заряда противоположных знаков 5) дефект, обусловленный присутствием в структуре посторонних атомов вследствие поверхностной сегрегации
3	В обратном пространстве элементарная ячейка обратной решетки в форме ячейки Вигнера-Зейтса представляет собой:	1) первую зону Бриллюэна 2) кристаллическую решетку 3) двумерную решетку Браве 4) плоскость симметрии 5) трехмерную решетку Браве

4.	<p>Дайте определение химической неоднородности:</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Включает в себя неровности поверхности различной природы и отклонение структуры поверхности от структуры идеального кристалла идентичной решетки Браве. 2) Включает в себя абсолютно ровную поверхность, которая не отличается от идеального кристалла идентичной решетки Бравэ. 3) Это неоднородность, вызванная процессами десорбции остаточных газов. 4) Это неоднородность, вызванная процессами адсорбции остаточных газов. 5) Это неоднородность, обусловленный присутствием в структуре посторонних атомов вследствие поверхностной сегрегации.
5.	<p>На этом графике кривая 1 представляет собой</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Зависимость доли поверхностей раздела от размера зерна. 2) Долю межзеренных границ. 3) Долю тройных стыков. 4) Долю винтовых дислокаций. 5) Долю оставшихся на поверхности загрязнений.
6.	<p>На рисунке представлена</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Зависимость потенциальной энергии от положения атома вдоль поверхности. 2) Зависимость потенциальной энергии от расстояния атома от поверхности 3) Зависимость кинетической энергии от положения атома вдоль поверхности. 4) Зависимость кинетической энергии от расстояния атома от поверхности. 5) Зависимость силы притяжения от расстояния атома от поверхности.

7.	<p>На рисунке представлен следующий механизм перемещения кластеров</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Последовательное перемещение 2) Переползание 3) Испарение-конденсация 4) «Чехарда» 5) Краевая диффузия
8.	<p>Большинство атомарно-чистых поверхностей являются вицинальными, что это означает?</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Что они имеют террасы, ступени, изломы. 2) Что они не имеют ни одного дефекта. 3) Что они имеют только один тип дефектов. 4) Что они существуют только как идеальные модели. 5) Что все атомы такой поверхности имеют особенно сильное взаимодействие.
9.	<p>Чем вызвана химическая адсорбция?</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) изменением полярности молекул 2) увеличением скорости десорбции 3) действием слабых сил Ван-дер-Ваальса 4) повышением давления 5) ничем из вышесказанного
10.	<p>Чем вызвана физическая адсорбция?</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) изменением полярности молекул 2) увеличением скорости десорбции 3) действием слабых сил Ван-дер-Ваальса 4) повышением давления 5) испусканием электромагнитного излучения с широким спектром частот
11	<p>От чего зависит энтальпия физической адсорбции?</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) от градиента температур на поверхности 2) от разности давлений 3) только от молекулярной массы 4) от молекулярной массы и полярности 5) только от полярности
12	<p>Какой механизм химической адсорбции представлен на рисунке</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Потенциал ионизации свободного атома меньше потенциала выхода электронов из поверхности 2) Потенциал ионизации свободного атома больше потенциала выхода электронов из поверхности

		<p>3) Потенциал ионизации свободного примерно равен потенциалу выхода электронов из поверхности</p> <p>4) неполярная молекула</p> <p>5) неполярный адсорбент полярная молекула и полярный адсорбент</p>
13	<p>На рисунке представлены</p>	<p>1) Зонные структуры 1 – металла; 2 – адатома; 3 – свободного атома</p> <p>2) Зонные структуры 1 – адатома, 2 – металла; 3 – свободного атома</p> <p>3) Зонные структуры 1 – свободного атома 2 – металла; 3 – адатома</p> <p>4) Схема физической адсорбции</p> <p>5) Зависимость энергии от расстояния атома до поверхности</p>
14	<p>Что такое вторичная электронная эмиссия?</p>	<p>1) Испускание ионов твердым телом при бомбардировке электронами.</p> <p>2) Испускание электронов твердым телом при бомбардировке ионами.</p> <p>3) Испускание электронов твердым телом при бомбардировке электронами</p> <p>4) Испускание ионов твердым телом при его нагреве.</p> <p>5) Рекомбинация ионов и электронов на поверхности твердого тела без испускания частиц.</p>
15	<p>Какой закон формулируется таким образом: между частотой ν линий характеристического рентгеновского излучения и атомным номером Z испускающего его элемента справедливо соотношение $\sqrt{\nu} = C(Z - \sigma)$:</p>	<p>1) закон Мозли</p> <p>2) закон Гука</p> <p>3) закон Фарадея</p> <p>4) закон Ленца</p> <p>5) закон Ампера</p>
16	<p>Индексы Миллера для плоскости, проходящей через узлы с индексами $[[003]]$, $[[300]]$, $[[020]]$</p>	<p>1) (623)</p> <p>2) (345)</p> <p>3) (232)</p> <p>4) (258)</p> <p>5) (267)</p>
17	<p>Краткая запись Вуда для данной поверхности</p>	<p>1) 1x1</p> <p>2) 4x5</p> <p>3) 3x2</p>

		4) 4x4 5) 3x1
18	Матричная запись для данной поверхности 	1) $\begin{pmatrix} 4 & 2 \\ -3 & 1 \end{pmatrix}$ 2) $\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 2 & 0 \end{pmatrix}$ 3) $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ 4) $\begin{pmatrix} 2 & 2 \\ 0 & -3 \end{pmatrix}$ 5) $\begin{pmatrix} 2 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$
19	Как будет выглядеть полная запись Вуда для адсорбции O ₂ на Si (223) 2x3	1) O ₂ - Si (111) 2x3 2) O ₂ 2x3 (111) - Si 3) Si (223) 2x3 - O ₂ 4) O ₂ (111) 2x3 - Si 5) Si 2x3 (111) - O ₂
20	Определить число атомов, приходящихся на одну элементарную ячейку кристалла вольфрама (ОЦК решетка).	1) 1 2) 2 3) 4 4) 6 5) 14

Дата _____

Подпись обучающегося _____

Вариант 9

Инструкция. Тест содержит 20 вопросов. На выполнение варианта отводится 45 минут. К каждому заданию даны 5 вариантов ответа, среди которых только 1 является верным. При выполнении заданий сравните полученный ответ с предложенным. В бланке обведите номер варианта ответа.

№ задания	Задание	Варианты ответов
1	Кольца для уплотнения в СВВ установках делают из ...	1) эластомер 2) олово 3) свинец 4) медь 5) чугун
2	Релаксация – это...	1) тип атомной перестройки поверхности, в результате которой атомная структура поверхностных слоев существенно отличается от объемной структуры кристаллов 2) это тип атомной перестройки поверхности, при котором атомная структура сохраняется, но расстояние между слоями либо их взаимное расположение изменяется. 3) самопроизвольный процесс увеличения концентрации растворенного вещества у поверхности раздела двух фаз 4) исчезновение пары свободных носителей заряда противоположных знаков в среде с выделением энергии 5) дефект, обусловленный присутствием в структуре посторонних атомов вследствие поверхностной сегрегации
3	Найдите несуществующую трехмерную решетку из нижеперечисленных:	1) примитивная кубическая 2) примитивная триклинная 3) базоцентрированная кубическая 4) примитивная ромбическая 5) примитивная тетрагональная
4.	Дайте определение индуцированной неоднородности:	1) Это неоднородность, вызванная процессами десорбции остаточных газов. 2) Это неоднородность, вызванная процессами адсорбции остаточных газов. 3) Это дефект, обусловленный присутствием в структуре посторонних атомов вследствие поверхностной сегрегации. 4) Включает в себя неровности поверхности различной природы и

		<p>отклонение структуры поверхности от структуры идеального кристалла идентичной решетки Браве.</p> <p>5). Включает в себя абсолютно ровную поверхность, которая не отличается от идеального кристалла идентичной решетки Браве</p>
5.	<p>На этом графике кривая 2 представляет собой</p>	<p>1) Зависимость доли поверхностей раздела от размера зерна. 2) Зависимость доли межзеренных границ от размера зерна.. 3) Долю тройных стыков. 4) Долю винтовых дислокаций. 5) Долю оставшихся на поверхности загрязнений.</p>
6.	<p>$n_A = n_0 \exp\left(-\frac{\Delta G_A}{k_B T}\right)$, Данная формула определяет:</p>	<p>1) равновесную концентрацию адатомов 2) концентрацию вакансий 3) концентрацию примеси 4) количество адатомов 5) количество вакансий</p>
7.	<p>На рисунке представлен следующий механизм перемещения кластеров</p>	<p>1) Последовательное перемещение 2) Переползание 3) Испарение-конденсация 4) «Чехарда» 5) Краевая диффузия</p>
8.	<p>Какими могут быть вицинальные поверхности?</p>	<p>1) Разориентированные только в одном направлении. 2) Разориентированные только в двух направлениях. 3) Разориентированные и в одном, и в двух направлениях. 4) Не имеющие разориентированности. 5) Ничего из вышеперечисленного.</p>
9.	<p>Проведите соответствие возможных гетероэпитаксиальных структур на фасетированной поверхности:</p>	<p>1) однородное покрытие, 2) система изолированных «толстых» кластеров, 3) гетерофазная система при большой толщине покрытия, 4) система изолированных «тонких» кластеров. 5) гетерофазная система при большой толщине покрытия.</p>
10.	<p>Какое количество энергии выделяется при физической адсорбции?</p>	<p>1) порядка 4 кДж/моль</p>

		2) никаких изменений в энергии не происходит 3) порядка 100 кДж/моль 4) энергия поглощается 5) >100 кДж/моль
11	Энтальпия физической адсорбции составляет	1) 5-40 кДж/моль 2) 40-800 кДж/моль 3) 1 кДж/моль 4) 300 кДж/моль 5) все ответы неверные
12	Какой механизм химической адсорбции представлен на рисунке 	1) Потенциал ионизации свободного атома меньше потенциала выхода электронов из поверхности 2) Потенциал ионизации свободного атома больше потенциала выхода электронов из поверхности 3) Потенциал ионизации свободного атома примерно равен потенциалу выхода электронов из поверхности 4) неполярная молекула и неполярный адсорбент 5) полярная молекула и полярный адсорбент
13	На рисунке схематично представлена адсорбция 	1) Лэнгмюра 2) БЭТ 3) Полимолекулярная 4) многослойная 5) нет верного ответа
14	Как называется процесс удаления адсорбированных атомов или молекул с поверхности твердого тела сильным электрическим полем?	1) Адсорбция полем. 2) Десорбция полем. 3) Сублимация. 4) Электронная эмиссия. 5) Ионная очистка.
15	К какой инструментальной группе относятся электронные пушки	1) анализаторы 2) электронно-оптические устройства 3) детекторы отклика поверхности 4) источники воздействия 5) ионно-оптические устройства
16	Индексы Миллера для плоскости, проходящей через узлы с индексами $[[002]]$, $[[100]]$, $[[020]]$	1) (623) 2) (345) 3) (126) 4) (211) 5) (267)
17	Краткая запись Вуда для данной поверхности	1) 2x2 2) 1x3 3) 3x1 4) 2x5 5) 4x2

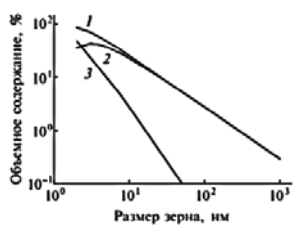
18	<p>Матричная запись для данной поверхности</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) $\begin{pmatrix} 3 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ 2) $\begin{pmatrix} 0 & -3 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$ 3) $\begin{pmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}$ 4) $\begin{pmatrix} 2 & 2 \\ 0 & 3 \end{pmatrix}$ 5) $5) \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 1 & 2 \end{pmatrix}$
19	<p>Как будет выглядеть полная запись Вуда для адсорбции O₂ на Si (143) 3x3</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) O₂ - Si (111) 2x3 2) O₂ 2x3 (111) - Si 3) Si (143) 3x3 - O₂ 4) O₂ (111) 2x3 - Si 5) Si 2x3 (111) - O₂
20	<p>Определить число атомов, приходящихся на одну элементарную ячейку кристалла ванадия (ОЦК решетка).</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) 1 2) 2 3) 4 4) 6 5) 14

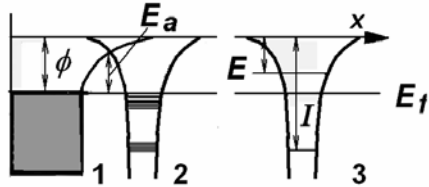
Дата _____

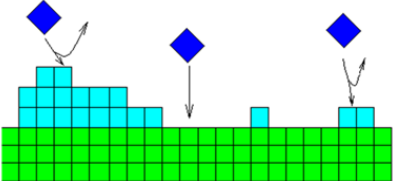
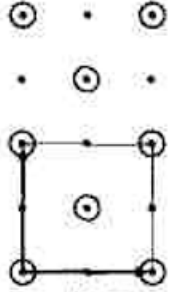
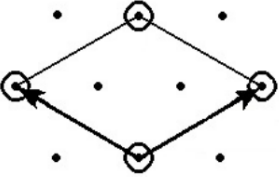
Подпись обучающегося _____

Вариант 10

Инструкция. Тест содержит 20 вопросов. На выполнение варианта отводится 45 минут. К каждому заданию даны 5 вариантов ответа, среди которых только 1 является верным. При выполнении заданий сравните полученный ответ с предложенным. В бланке обведите номер варианта ответа.

№ задания	Задание	Варианты ответов
1	Назначение шлюзов в СВВ установках	1) достижение СВВ 2) уменьшение объема откачки и возможность быстрой замены образцов 3) уменьшение объема откачки 4) возможность быстрой замены образцов 5) напуск воздуха
2	Ось симметрии – это...	1) это кристаллографическая ось, принимаемая за координатную 2) это математический образ, представляющий собой в обратном пространстве первую зону Бриллюэна 3) это условная линия, вокруг которой концентрация носителей заряда одинакова 4) это линия, соединяющая в два атома между собой 5) это воображаемая ось, при повороте вокруг которой на 360 градусов элементы кристалла повторяются 2,3,4,6 раз
3	Сколько плоскостей симметрии характерно для кубической решетки?	1) 3 2) 16 3) 9 4) 7 5) 11
4.	При остаточном давлении 10^{-4} Па адсорбированный слой атомов образуется в течение:	1) примерно 1 секунды 2) 20 секунд 3) 1 минуты 4) 1 часа 5) 2-3 часа
5.	На этом графике кривая 3 представляет собой 	1) Зависимость доли поверхностей раздела от размера зерна. 2) Зависимость доли межзеренных границ от размера зерна.. 3) Зависимость доли тройных стыков от размера зерна. 4) Долю винтовых дислокаций. 5) Долю оставшихся на поверхности загрязнений.

6.	$\langle \Delta r^2 \rangle = \nu a^2 t$, Данная формула определяет:	1) равновесную концентрацию адатомов 2) среднее квадратичное смещение атома за время t 3) смещение молекулы за время t 4) среднее количество адатомов 5) количество вакансий
7.	Сколько всего индивидуальных механизмов движения кластеров?	1) 1 2) 2 3) 3 4) 4 5) 5
8.	Какие дефекты оказывают влияние на поверхность?	1). Только точечные. 2). Только объёмные. 3). Только линейные. 4). Точечные, линейные и объёмные. 5). Ничего из вышеперечисленного
9.	Сколько всего индивидуальных механизмов движения кластеров?	1 2) 2 3) 3 4) 4 5) 5
10.	Что делает физическая адсорбированная молекула при достижении энергии диффузии?	1) покидает поверхность 2) не меняет своего положения на поверхности 3) начинается процесс химической адсорбции 4) свободно перемещается по поверхности 5) уходит в глубь поверхности
11	Энтальпия химической адсорбции составляет	1) 5-40 кДж/моль 2) 40-800 кДж/моль 3) 1 кДж/моль 4) 300 кДж/моль 5) все ответы неверные
12	Какой механизм химической адсорбции представлен на рисунке 	1) Потенциал ионизации свободного атома меньше потенциала выхода электронов из поверхности 2) Потенциал ионизации свободного атома больше потенциала выхода электронов из поверхности 3) Потенциал ионизации свободного примерно равен потенциалу выхода электронов из поверхности 4) неполярная молекула и неполярный адсорбент 5). полярная молекула и полярный адсорбент

13	<p>На рисунке схематично представлена адсорбция</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Лэнгмюра 2) БЭТ 3) Томпсона 4) Фарадея 5) нет верного ответа
14	<p>Как называется процесс испускания электронов поверхностью твердых тел при ее бомбардировке ускоренными электронами?</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Фотоэлектронная эмиссия. 2) Испускание α-частиц. 3) Первичная электронная эмиссия. 4) Вторичная электронная эмиссия. 5) Коронный разряд.
15	<p>К какой инструментальной группе относятся ионные пушки</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) анализаторы 2) электронно-оптические устройства 3) детекторы отклика поверхности 4) источники воздействия 5) ионно-оптические устройства
16	<p>Индексы Миллера для плоскости, проходящей через узлы с индексами $[[006]]$, $[[200]]$, $[[030]]$</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) (623) 2) (345) 3) (126) 4) (258) 5) (321)
17	<p>Краткая запись Вуда для данной поверхности</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1) 3x3 2) 2x2 3) 4x2 4) 5x1 5) 4x1
18	<p>Краткая запись Вуда для данной поверхности</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1) $\begin{pmatrix} 3 & 2 \\ -4 & 1 \end{pmatrix}$ 2) $\begin{pmatrix} 4 & 2 \\ 1 & -2 \end{pmatrix}$ 3) $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}$ 4) $\begin{pmatrix} 2 & 1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$ 5) $\begin{pmatrix} 2 & 5 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$
19	<p>Как будет выглядеть полная запись Вуда для адсорбции N_2 на Si (133) 3x3</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) O_2 - Si (111) 2x3 2) O_2 2x3 (111) - Si 3) Si (133) 3x3 - N_2 4) O_2 (111) 2x3 - Si 5) Si 2x3 (111) - O_2

20	Определить число атомов, приходящихся на одну элементарную ячейку кристалла молибдена (ОЦК решетка).	1) 1 2) 2 3) 4 4) 6 5) 14
----	--	---------------------------------------

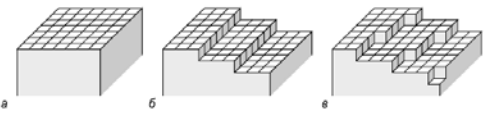
Дата _____

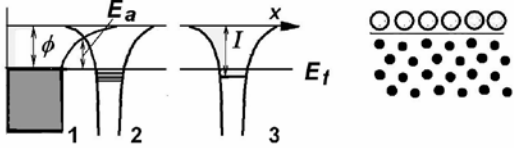
Подпись обучающегося _____

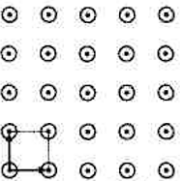
Вариант 11

Инструкция. Тест содержит 20 вопросов. На выполнение варианта отводится 45 минут. К каждому заданию даны 5 вариантов ответа, среди которых только 1 является верным. При выполнении заданий сравните полученный ответ с предложенным. В бланке обведите номер варианта ответа.

№ задания	Задание	Варианты ответов
1	Материалы, используемые внутри вакуумной камеры, не должны давать ... насыщенных паров	1) высокого давления 2) высокой плотности 3) низкого давления 4) низкой плотности 5) высокотемпературных
2	Кристаллическая решетка – это...	1) расположение атомов в монокристалле 2) это область пространства с центром в некоторой точке решетки Браве, которая лежит ближе к этой точке решетки чем к какой-либо другой точке 3) это вспомогательный геометрический образ, вводимый для анализа строения кристалла, имеет вид сетки, которая образована путем трансляции элементарной ячейки 4) совокупность электронов и дырок, движение которых ограничено в пространстве условными гранями 5) это реальная кристаллическая структура
3	Что является движущей силой релаксации:	1) Давление и температура 2) Сила тяжести 3) Сила упругости 4) Силы притяжения и отталкивания 5) Ничего из вышеперечисленного
4.	При остаточном давлении 10^{-7} Па адсорбированный слой атомов образуется в течение:	1) 1 секунды 2) 20 секунд 3) 1 минуты 4) примерно 1000 секунд 5) суток
5.	На этом графике не представлена 	1) Зависимость доли поверхностей раздела от размера зерна. 2) Зависимость доли межзеренных границ от размера зерна.. 3) Зависимость доли тройных стыков от размера зерна. 4) Зависимость доли винтовых дислокаций от размера зерна. 5) Зависимость объемного содержания поверхностей раздела от размера зерна

6.	<p>Как изменяется электрическая проводимость и температуропроводность межзеренной границе?</p>	<p>1) Понижение электрической проводимости и температуропроводности. 2) Повышение электрической проводимости и температуропроводности. 3) Повышение электрической проводимости, понижение температуропроводности. 4) Понижение электрической проводимости, повышение температуропроводности. 5) Не изменится.</p>
7.	<p>Сколько согласованных коллективных механизмов движения кластеров?</p>	<p>1) 1 2) 2 3) 3 4) 4 5) 5</p>
8.	<p>На каком из приведенных рисунков представлена сингулярная поверхность?</p> 	<p>1) б. 2) а. 3) в. 4) На всех рисунках. 5) Ни на одном</p>
9.	<p>Дайте определение люминесценции</p>	<p>1) явление поглощение энергии веществом с последующим её переизлучением в видимом или близком к нему диапазоне; 2) Физическое явление, заключающееся в свечении вещества, облучаемого быстрыми электронами; 3) Нетермическое испускание фотонов веществом, возникающее при возбуждении вещества электромагнитным излучением в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном диапазонах длин волн; 4) это явление светового излучения, возникающее при приложении электрического поля к полупроводнику, в частности к люминофору; 5) это явление, при котором свет генерируется, когда материал механически растягивается, разрывается, царапается, дробится или трется.</p>

10.	Температурная зависимость физической адсорбции характеризуется тем, что:	1) при увеличении температуры количество адсорбированного вещества увеличивается 2) при увеличении температуры количество адсорбированного вещества уменьшается 3) при уменьшении температуры количество адсорбированного вещества уменьшается 4) при увеличении температуры количество адсорбированного вещества не изменяется 5) все вышеперечисленные утверждения не характеризуют температурную зависимость физической адсорбции
11	Сколько существует механизмов, по которым может осуществляться физическая адсорбция?	1) 10 2) >10 3) бесконечно много 4) 4 5) их количество зависит от температуры адсорбции и может изменяться
12	Какой механизм химической адсорбции представлен на рисунке 	1) неполярная молекула и неполярный адсорбент 2) полярная молекула и неполярный адсорбент 3) неполярная молекула и полярный адсорбент 4) полярная молекула и полярный адсорбент 5) нет правильного ответа
13	Какое предположение является верным для теории Лэнгмюра?	1) Адсорбционные центры адсорбента являются однородными и равномерно распределены на его поверхности; 2) Адсорбированная молекула занимает на поверхности адсорбента только один адсорбционный центр; 3) Взаимодействие между адсорбированными молекулами в адсорбционном слое отсутствует; 4) Процесс адсорбции завершается образованием мономолекулярного адсорбционного слоя, когда все адсорбционные центры заняты молекулами адсорбирующегося вещества; 5) Всё выше перечисленное.

14	Что есть термоэлектронная эмиссия?	1) Испускания электронов твердыми телами при бомбардировке ускоренными электронами. 2) Испускания электронов твердыми телами в ходе их радиоактивного облучения. 3) Испускания электронов твердыми телами под воздействием электрического поля. 4) Испускания электронов твердыми телами под воздействием магнитного поля. 5) Испускания электронов твердыми телами вследствие их нагрева
15	К какой инструментальной группе относятся ВЭУ:	1) анализаторы 2) электронно-оптические устройства 3) детекторы отклика поверхности 4) источники воздействия 5) ионно-оптические устройства
16	Индексы Миллера для плоскости, проходящей через узлы с индексами $[[002]]$, $[[100]]$, $[[010]]$	1) (221) 2) (345) 3) (126) 4) (258) 5) (267)
17	Краткая запись Вуда для данной поверхности 	1) 1x1 2) 2x2 3) 3x4 4) 3x2 5) 2x4
18	Матричная запись для данной поверхности 	1) $\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$ 2) $\begin{pmatrix} 0 & 2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ 3) $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}$ 4) $\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 5 & 2 \end{pmatrix}$ 5) $\begin{pmatrix} 4 & -1 \\ 2 & 0 \end{pmatrix}$
19	Как будет выглядеть полная запись Вуда для адсорбции N_2 на Si (123) 1x3	1) $O_2 - Si (111) 2 \times 3$ 2) $O_2 2 \times 3 (111) - Si$ 3) $Si (123) 1 \times 3 - N_2$ 4) $O_2 (111) 2 \times 3 - Si$ 5) $Si 2 \times 3 (111) - O_2$
20	Определить число атомов, приходящихся на одну элементарную ячейку кристалла золота (ГЦК решетка).	1) 4 2) 7 3) 6 4) 2 5) 1

Дата _____

Подпись обучающегося _____

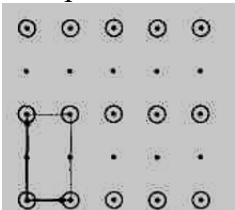
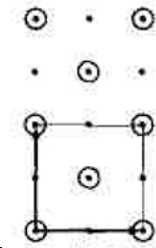
Вариант 12

Инструкция. Тест содержит 20 вопросов. На выполнение варианта отводится 45 минут. К каждому заданию даны 5 вариантов ответа, среди которых только 1 является верным. При выполнении заданий сравните полученный ответ с предложенным. В бланке обведите номер варианта ответа.

№ задания	Задание	Варианты ответов
1	Атомарно-чистая поверхность – это	1) вицинальная поверхность 2) поверхность, у которой концентрация посторонних атомов меньше концентрации легирующей примеси 3) поверхность, у которой концентрация посторонних атомов выше предела чувствительности используемого метода химического анализа 4) поверхность, которая имеет концентрацию примесей, не препятствующую воспроизводимому получению заданных значений и стабильности параметров, получаемых изделий. 5) поверхность, у которой концентрация посторонних атомов ниже предела чувствительности используемого метода химического анализа
2	Какой из перечисленных ниже сингоний не существует?	1) квадратная 2) моноклинная 3) кубическая 4) гексагональная 5) триклинная
3	Что является движущей силой реконструкция:	1) Реконструкция вызвана стремлением к системе, обладающей максимальной поверхностной энергией. 2) Реконструкция вызвана стремлением к системе, обладающей минимальной внутренней энергией. 3) Реконструкция вызвана стремлением к системе обладающей минимальной поверхностной энергией. 4) Реконструкция вызвана стремлением к системе, обладающей максимальной внутренней энергией. 5) Реконструкция вызвана стремлением к системе обладающей минимальным поверхностным зарядом.
4.	Дайте определение кристалла Кесселя:	1) Модель, которая показывает наиболее характерные положения атомов, определяющие свойства

		<p>дефектной поверхности простой кубической решетки.</p> <p>2) Модель, которая показывает наиболее характерные положения атомов, определяющие свойства дефектной поверхности гранцентрированной кубической решетки.</p> <p>3) Модель, которая показывает наиболее характерные положения атомов, определяющие свойства дефектной поверхности объемноцентрированной кубической решетки.</p> <p>4) Модель, которая показывает наиболее характерные положения атомов, определяющие свойства дефектной поверхности гексагональной решетки.</p> <p>5) Реальный кристалл.</p>
5.	Если твёрдое тело состоит из кристаллитов размером < 6 нм, то какой будет доля поверхностей раздела?	<p>1) 25%</p> <p>2) $< 50\%$</p> <p>3) $> 50\%$</p> <p>4) не изменится</p> <p>5) 35%</p>
6.	Уменьшить поверхностную энергию можно двумя способами:	<p>1) Увеличением площади поверхности и формированием поверхности с высокой поверхностной энергией</p> <p>2) Снижением площади поверхности и формированием поверхности с низкой поверхностной энергией</p> <p>3) Снижением площади поверхности и формированием поверхности с высокой поверхностной энергией</p> <p>4) Увеличением площади поверхности и формированием поверхности с низкой поверхностной энергией</p> <p>5) Все утверждения неверны</p>
7.	Как перемещается электрон в Таммовском состоянии?	<p>1) Свободно перемещается вдоль поверхности.</p> <p>2) Свободно перемещается только вглубь поверхности.</p> <p>3) Свободно перемещается только наружу.</p> <p>4) Не перемещается вовсе.</p> <p>5) Свободно перемещается в любом направлении.</p>

8.	<p>На рисунке представлена:</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1) сингулярная поверхность 2) вицинальная поверхность, разориентированная в одном направлении 3) вицинальная поверхность, разориентированная в двух направлениях 4) атомарно чистая поверхность технологически чистая поверхность
9.	<p>Какой вид кремния (монокристаллический или пористый) демонстрирует сильную, индуцируемую светом, люминесценцию?</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Монокристаллический; 2) Кремний не проявляет свойств люминесценции; 3) Пористый; 4) Оба проявляют одинаково сильно; 5) Оба проявляют одинаково слабо.
10.	<p>Какой метод используется для изучения механизма формирования связи и взаимодействия между адсорбированными молекулами и субстратом (является самым эффективным)?</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) сканирование поверхности атомно-силовым микроскопом 2) спектральный анализ 3) с помощью электронной микроскопии 4) бомбардировка ионами аргона 5) травление поверхности раствором щелочи
11	<p>Потенциальная энергия взаимодействия неполярных молекул с одним атомом неполярной решётки твёрдого тела описывается формулой:</p> $U = Cr^{-6} + Br^{-12}$	<ol style="list-style-type: none"> 1) количество полярных молекул на поверхности 2) константу скорости 3) расстояние между центрами частиц 4) количество неполярных молекул на поверхности 5) вид адсорбента
12	<p>Какой механизм химической адсорбции представлен на рисунке</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1) неполярная молекула и неполярный адсорбент 2) полярная молекула и неполярный адсорбент 3) неполярная молекула и полярный адсорбент 4) полярная молекула и полярный адсорбент 5) нет правильного ответа
13	<p>Какая теория предполагает возможность адсорбции частиц поверх уже имеющихся адсорбированных слоёв?</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Теория действующих масс; 2) Теория БЭТ; 3) Теория Поляни; 4) Теория Ленгмюра; 5) Зонная теория
14	<p>Как называются вторичные электроны в случае вторичной электронной эмиссии, энергия которых зависит от атомов, испустивших эти электроны, но не от энергии первичных электронов?</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Оже-электроны. 2) Упруго отраженные электроны. 3) Пазитроны. 4) Истинно вторичные электроны. 5) Катионы.

15	За счет какого физического явления происходит термо-электронная эмиссия	1) понижение давление 2) повышенное давление 3) рентгеновского излучения 4) α -излучение 5) повышенная температура
16	Индексы Миллера для плоскости, проходящей через узлы с индексами $[[006]]$, $[[300]]$, $[[020]]$	1) (623) 2) (231) 3) (126) 4) (258) 5) (267)
17	Краткая запись Вуда для данной поверхности 	1) 5x2 2) 1x2 3) 3x2 4) 4x1 5) 5x3
18	Матричная запись для данной поверхности 	1) $\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$ 2) $\begin{pmatrix} 4 & 2 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ 3) $\begin{pmatrix} 1 & -2 \\ 4 & 3 \end{pmatrix}$ 4) $\begin{pmatrix} 5 & 1 \\ 0 & 3 \end{pmatrix}$ 5) $\begin{pmatrix} 3 & 2 \\ 1 & -3 \end{pmatrix}$
19	Как будет выглядеть полная запись Вуда для адсорбции N_2 на Si (143) 2x3	1) $O_2 - Si (111) 2x3$ 2) $O_2 2x3 (111) - Si$ 3) $Si (143) 2x3 - N_2$ 4) $O_2 (111) 2x3 - Si$ 5) $Si 2x3 (111) - O_2$
20	Определить число атомов, приходящихся на одну элементарную ячейку кристалла бария (ОЦК решетка).	1) 1 2) 2 3) 4 4) 6 5) 14

Дата _____

Подпись обучающегося _____

IV. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ

Белорусский национальный технический университет

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

Белорусского национального
технического университета


Ю.А. Николайчик

20.12.2022

Регистрационный № УД- НСР 06-88 /уч.

ФИЗИКА ПОВЕРХНОСТИ

Учебная программа учреждения высшего образования

по учебной дисциплине для специальностей

1-38 01 04 «Микро- и наносистемная техника»

2022 г.

Учебная программа составлена на основе типовой учебной программы «Физика поверхности», утв. 25.07.2012, рег. № ТД-1.949/тип.

СОСТАВИТЕЛЬ:

Е.Н.Щербакова, доцент кафедры «Микро- и нанотехника» Белорусского национального технического университета, кандидат физико-математических наук, доцент.

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

П.С. Богдан, старший преподаватель кафедры «Конструирование и производство приборов» Белорусского национального технического университета, кандидат технических наук;

В.А. Лапицкая, научный сотрудник Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, кандидат технических наук.

РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:

Кафедрой «Микро- и нанотехника» Белорусского национального технического университета
(протокол № 3 от 22.11.2022 г.)

Заведующий кафедрой



С.А.Чижик

Методической комиссией приборостроительного факультета Белорусского национального технического университета
(протокол № 3 от 23.11. 2022 г.)

Председатель методической комиссии



В.В. Красовский

Научной библиотекой БНТУ



Т.И.Бирюкова

Научно-методическим советом Белорусского национального технического университета (протокол № 11 секции №1 от 20.12 2022г.)

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Учебная программа по учебной дисциплине «Физика поверхности» разработана для специальности 1-38 01 04 «Микро- и наносистемная техника».

Целью изучения учебной дисциплины является формирование системы знаний, умений и навыков в области атомной структуры, кристаллического и молекулярного строения поверхности твердых тел, процессов взаимодействия поверхности с адсорбатом, физических свойств поверхности, математического описания и моделирования молекулярно-кристаллической структуры поверхности.

Основными задачами преподавания учебной дисциплины являются: приобретение студентом знаний о физической и химической сущности явлений, происходящих на границе раздела фаз, в поверхностных и приповерхностных слоях твердых материалов, типах атомной перестройки поверхности - релаксации и реконструкции, процессах адсорбции и десорбции, основных методах исследования поверхности.

Дисциплина базируется на курсах «Физика», «Информатика», «Математика», «Материалы электронной техники», «Материаловедение и технология материалов» и т.д. Знания и умения, полученные студентами при изучении данной дисциплины, необходимы для освоения последующих специальных дисциплин, связанных с проектированием и расчетом компонентов нано- и микросистемной техники, таких как «Технологии нано- и микросистемной техники», «Конструирование и расчет компонентов микросистемной техники», «Контроль параметров материалов и компонентов электронной техники».

В результате изучения учебной дисциплины «Физика поверхности» будущий специалист должен:

знать:

- принципы построения геометрических конфигураций поверхностей различных материалов, исходя из кристаллической структуры;
- взаимодействие поверхности с адсорбатом, физические и химические явления, происходящие на границе раздела фаз, в поверхностных и приповерхностных слоях твердых материалов и жидкостей;
- основные методы исследования поверхности;

уметь:

- характеризовать физические свойства поверхности, кристаллическую структуру, места локализации на поверхности дефектов структуры;

уметь:

- анализировать типы поверхностей в зависимости от кристаллической структуры субстрата, геометрическую структуру низко и высоко индексных поверхностей металлов и химических соединений;
- характеризовать энергетику и способность поверхности к молекулярной и диссоциативной адсорбции;

владеть:

- навыками математического описания и моделирования молекулярно-кристаллической структуры поверхности.

Освоение данной учебной дисциплины обеспечивает формирование следующей компетенции:

БПК-11. Владеть основными понятиями и законами физики поверхности, знать основные методы исследования поверхности, уметь применять эти методы для получения технологической информации.

Согласно учебным планам на изучение учебной дисциплины отведено:

- для дневной формы получения высшего образования всего 120 ч., из них аудиторных - 84 часов;

- для заочной формы получения высшего образования, интегрированного со средним специальным образованием всего 120 ч., из них аудиторных – 14 часов.

Распределение аудиторных часов по курсам, семестрам и видам занятий приведено ниже.

Таблица 1.

Дневная форма получения высшего образования					
Курс	Семестр	Лекции, ч.	Лабораторные занятия, ч.	Практические занятия, ч.	Форма текущей аттестации
3	5	68	-	16	экзамен

Таблица 2.

Заочная форма получения высшего образования, интегрированного со средним специальным образованием					
Курс	Семестр	Лекции, ч.	Лабораторные занятия, ч.	Практические занятия, ч.	Форма текущей аттестации
2	4	2	-	-	-
3	5	6	-	6	экзамен

СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

Раздел I. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ФИЗИКЕ ПОВЕРХНОСТИ

Тема 1.1. Введение

Предмет дисциплины «Физика поверхности». Цель и задачи дисциплины. Внутренние и внешние поверхности. Физические и химические явления, показывающие специфические свойства поверхностей и границ раздела. Использование поверхностных эффектов в науке и технике. Понятие атомарно-чистой и технологически чистой поверхности. Методы получения атомарно-чистых поверхностей.

Тема 1.2. Основы двумерной кристаллографии

Атомные плоскости идеального кристалла. Геометрическая конфигурация поверхности. Структура идеального кристалла и симметрия идеальной поверхности. Определение индексов Миллера. Индексы Миллера плоскостей кристалла. Индексы направлений. Низко- и высокоиндексные поверхности важных типов кристаллов.

Решётка, базис и кристаллическая структура (трёхмерный случай). Концепция двумерной (2D) решётки. Двумерные решетки Браве. Матричная запись и запись Вуда для поверхностных структур. Двумерная обратная решетка. Связь с трёхмерной обратной решеткой и предельный переход. Двумерные зоны Бриллюэна. Двумерные точечные и пространственные группы. Проецирование трёхмерного кристалла на его поверхность. Поверхностные элементарные ячейки.

Тема 1.3. Атомная структура чистых поверхностей и поверхностей с адсорбатами

Релаксация и реконструкция поверхности. Виды релаксации и реконструкции. Симметрия релаксированных и реконструированных поверхностей. Движущие силы реконструкции и релаксации. Механизм образования димеров на кремнии.

Примеры реконструкции поверхностей металлов, диэлектриков и полупроводников. Атомная структура чистых поверхностей. Релаксированные поверхности металлов Al(110), Fe(211). Реконструированные поверхности металлов Pt(100), Pt(110), W(100). Поверхность графита. Поверхности элементарных полупроводников: Si(100), Si(111), Ge(111). Поверхности сложных полупроводников типа $A_{III}B_{V}$: GaAs(110), GaAs(111) и GaAs(111)

Понятия о высокоиндексных ступенчатых поверхностях. Структурные дефекты поверхности. Сингулярные и вичинальные поверхности. Неоднородные поверхности. Понятие физической, химической и индуцированной неоднородности поверхности. Адаомы. Вакансии. Дефекты замещения. Дислокации. Доменные границы. Ступени. Фасетирование.

Тема 1.4. Основные модели поверхности

Кристалл Кесслея. Величина энергии связи атомов в характерных положениях на поверхности. Модель ТСИ. Энергия образования адатома и вакансии.

Определение и особенности структуры консолидированных наноматериалов. Доля поверхностей раздела и межзёренных границ в консолидированных наноматериалах. Влияние размера зерна на общую долю поверхностей раздела, долю межзёренных границ и тройных стыков.

Раздел II. ПРОЦЕССЫ АДСОРБЦИИ И ДЕСОРБЦИИ, ДИФФУЗИЯ И ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ

Тема 2.1. Процессы адсорбции и десорбции

Понятия адсорбат, кромка и суперструктура. Понятие адсорбции и сорбции. Общие понятия о физической и химической адсорбции. Основные характеристики процесса адсорбции. Связывание молекул с поверхностью. Стадии взаимодействия молекул с поверхностью. Механизмы физической адсорбции. Механизмы взаимодействия атомов при физической адсорбции. Энергия взаимодействия атома поверхности и молекулы адсорбата при физической и химической адсорбции. Основные механизмы хемосорбции на твердых телах. Кинетика и скорость адсорбции. Процессы десорбции. Скорость десорбции.

Тема 2.2. Диффузия на поверхности

Процессы и атомные механизмы диффузии по поверхности. Уравнение Фика и массопереноса. Собственная диффузия и диффузия массопереноса. Анизотропия поверхностной диффузии. Атомные манипуляции на поверхности. Случайное блуждание. Диффузия отдельного атома и химическая диффузия. Атомные механизмы поверхностной диффузии. Прыжковый механизм. Механизм атомного обмена. Механизм туннелирования. Вакансионный механизм. Самоорганизация и начальные стадия роста пленок на поверхности. Поверхностная диффузия кластеров. Поверхностная диффузия и формирование фаз. Поверхностная электромиграция.

Тема 2.3. Электронное строение поверхности

Приближения свободных электронов и метода сильной связи, связь с кинематической теорией рассеяния. Зоны Бриллюэна. Плотности состояний для структур с пониженной размерности. Состояния Тамма и Шокли. Коллективные электронные колебания на поверхности. Тунелирование электронов, поверхностный потенциал. Работа выхода электронов. Работа выхода металлов. Работа выхода полупроводников. Поверхностная проводимость. Измерения работы выхода.

Четырехзондовый метод измерения поверхностного сопротивления. Сопротивление как функция расстояния между зондами. Профили сопротивления.

Тема 2.4. Термодинамика поверхности

Термодинамические параметры поверхностного слоя. Геометрические параметры поверхности. Поверхностное натяжение и внутренняя (полная) удельная поверхностная энергия. Метод избыточных величин Гиббса. Метод “слоя конечной толщины”. Зависимость энергетических параметров поверхности от температуры. Механизм процессов самопроизвольного уменьшения поверхностной энергии и формирование поверхностного слоя. Методы определения поверхностного натяжения: метод капиллярного поднятия жидкости, метод отрыва кольца, метод максимального давления в пузырьке, сталогмометрический метод. Уравнение Юнга-Лапласа. Фундаментальные адсорбционные уравнения Гиббса.

Адгезия, смачивание и растекание жидкости. Количественные характеристики когезии и адгезии. Уравнение Дюпре. Механизм процессов адгезии. Смачивание. Закон Юнга. Связь работы адгезии с краевым углом. Уравнение Дюпре-Юнга. Смачивание реальных твердых тел. Уравнение Дерягина-Венцеля. Теплота смачивания. Растекание жидкостей. Эффект Марангони. Межфазное натяжение на границах между взаимно насыщенными жидкостями.

Тема 2.5. Электрокинетические явления

Электрокинетический потенциал. Кинетика переноса заряда и массы через поверхностный слой в системах твердое тело - газ. Уравнение Гельмгольца-Смолуховского. Электрофорез. Потенциал и ток течения. Расчет величин токов (потоков) на границе твердое тело - газ с использованием молекулярно-кинетической теории газов и параметров термодинамического равновесия в системе. Расчет электрического тока обмена на фазовой границе твердое тело - газ. Физическая модель (идеальный кристалл). Количественное определение токов обмена, исходя из параметров энергетического спектра носителей тока в твердом теле. Случай полупроводников с преимущественно ионным характером связи. Вывод формулы Ричардсона - Дашмена. Физический смысл параметров. Практическое применение электрокинетических явлений.

Раздел III. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ

Тема 3.1. Методы, основанные на электронной и ионной эмиссии

Общие представления о методах анализа поверхности. Физические явления, лежащие в основе методов диагностики поверхности. Ионное распыление и вторичная ионная эмиссия. Термо-ионная эмиссия. Полевая ионная эмиссия. Вторичная электронная эмиссия. Оже-электронная эмиссия. Оже-процесс. Термо-электронная эмиссия. Электронно-ионная эмиссия. Полевая электронная эмиссия. Фотоэлектронная эмиссия.

Тема 3.2. Рентгеновские методы. Устройство установок для исследования поверхности

Рентгеновское излучение в исследовании поверхности. Закон Мозли. Основные экспериментальные особенности и узлы аналитических установок для исследования поверхности.

Тема 3.3. Заключение

Фундаментальность науки о поверхности в жизни человека и в технике.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ
очная форма получения высшего образования

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Количество часов УСР	Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Иное		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	5 семестр							
1.	Общие сведения о физике поверхности							
1.1	Введение	2						
1.2	Основы двумерной кристаллографии	6						
	Практическое занятие №1. Построение низкоиндексных кристаллографических структур.		2					опрос
	Практическое занятие №2. Определение индексов Миллера.		2					опрос
1.3	Атомная структура чистых поверхностей и поверхностей с адсорбатами	6						
	Практическое занятие №3. Запись Вуда.		2					опрос
	Практическое занятие №4. Матричная запись.		2					опрос
1.4	Основные модели поверхности	6						
	Практическое занятие №5. Методы и программы визуализации результатов моделирования поверхности		2					опрос
2.	Процессы адсорбции и десорбции, диффузия и электронные свойства поверхности							
2.1	Процессы адсорбции и десорбции	8						
	Практическое занятие №6. Расчет скорости адсорбции		2					опрос
2.2	Диффузия на поверхности	8						
	Практическое занятие №5. Решение типовых задач		2					опрос

2.3	Электронное строение поверхности	6						
2.4	Термодинамика поверхности	6						
2.5	Электрокинетические явления	6						
3.	Основные методы исследования поверхности							
3.1	Методы, основанные на электронной и ионной эмиссии	6						
3.2	Рентгеновские методы. Устройство установок для исследования поверхности	6						
	Практическое занятие №8. Интерпретация результатов исследования поверхности		2				опрос	
3.3	Заключение	2						
	Итого за семестр	68	16				Экзамен	
	Всего аудиторных часов	84						

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ
заочная форма получения высшего образования, интегрированного со средним специальным образованием¹

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов			Форма контроля знаний
		Лекции	практические занятия	Лабораторные занятия	
4 семестр					
1.	Установочная лекция Общие сведения о физике поверхности	2			
	Итого за семестр	2			
5 семестр					
	Общие сведения о физике поверхности				
1.2	Основы двумерной кристаллографии	2			
	Практическое занятие №1. Построение низкоиндексных кристаллографических структур.		2		опрос
	Практическое занятие №2. Определение индексов Миллера.		2		опрос
1.3	Атомная структура чистых поверхностей и поверхностей с адсорбатами	2			
	Практическое занятие №3. Запись Вуда.		2		опрос
3.	Основные методы исследования поверхности				
3.1	Методы, основанные на электронной и ионной эмиссии	2			
	Итого за семестр	6	6		Экзамен
	Всего аудиторных часов		14		

¹ Темы учебного материала, не указанные в Учебно-методической карте, отводятся на самостоятельное изучение студента.

ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Список литературы

Основная литература

1. Учебно-методический комплекс по учебной дисциплине физика [Электронный ресурс]. Ч. 6. Квантовая оптика, физика атомного ядра и элементарные частицы для [строительных] специальностей /; Министерство образования Республики Беларусь, Белорусский национальный технический университет, Кафедра "Физика" ; сост.: А.К. Есман [и др.]. — Электрон. дан. — Минск : БНТУ, 2019. — 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). — Режим доступа : <https://rep.bntu.by/handle/data/51567>. — Систем. требования: IBM PC-совместимый ПК; Windows XP и выше; Adobe Reader; мышь. — Загл. с титул. экрана : 3.00.
2. Физические основы кремниевой наноэлектроники: учебное пособие [для вузов] / Г. И. Зебрев. – Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2017. – 240 с.: ил., табл., схемы. – (Нанотехнологии) . - ISBN 9785996301812: 15.84.
3. Рентгеноструктурный фазовый анализ: учебно-методическое пособие/ А.Г. Анисович. – Минск: [б. и.], 2020. – 38, [1] с.: ил., табл.: 4.80.

Дополнительная литература

4. Зенгуил, Эндрыю. Физика поверхности : пер. с / Эндрыю Зенгуил. — Москва: Мир, 1990. — 536 с. : ил. — ISBN 5-03-001599-X : 4.90. Зайцев, А.Л. Физика поверхности: структура, адсорбция : учебно-методическое пособие. - Минск : БНТУ, 2012. - 177 с.
5. Адамсон, Артур У. Физическая химия поверхностей : пер. с / Артур У. Адамсон. — Москва : Мир, 1979. — 568 с. : ил. : 10000.00.
6. Нефедов, В.И. Физические методы исследования поверхности твердых тел / В.И. Нефедов. — Москва : Наука, 1983. — 296 с. : ил. — (Физика, химия и механика поверхности) : 3.50.
7. Моррисон, С.Рой. Химическая физика поверхности твердого тела : пер. с / С.Рой Моррисон. — Москва : Мир, 1980. — 488 с. : ил. : 3.40.
8. Зайцев, А.Л. Физика поверхности: структура, адсорбция : учебно-методическое пособие / А.Л. Зайцев. — Минск : БНТУ, 2012. — 177 с. : ил. — 4248. — ISBN 978-985-525-738-8 : 7500.00.

Средства диагностики результатов учебной деятельности

Оценка уровня знаний студента производится по десятибалльной шкале в соответствии с критериями, утвержденными Министерством образования Республики Беларусь.

Для оценки достижений студента рекомендуется использовать следующий диагностический инструментарий:

- устный и письменный опрос во время практических занятий;
- защита выполненных на практических занятиях индивидуальных заданий;

- защита выполненных в рамках самостоятельной работы индивидуальных заданий;
- выступление студента на конференции по подготовленному реферату;
- сдача экзамена.

Тематика рефератов

1. Развитие науки о поверхности.
2. Энергия дисперсионного взаимодействия молекулы с поверхностью.
3. Ядерно-физические методы по определению пространственного распределения элементов в приповерхностных слоях.
4. Радиационно стойкие низкоразмерные системы Основные термодинамические характеристики поверхностного слоя
5. Энергетические модели поверхности
6. Методы элементного анализа, основанные на регистрации электронов
7. Методы элементного анализа, основанные на регистрации ионов
8. Методы элементного анализа, основанные на регистрации фотонов
9. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия.
10. Оже-электронная спектроскопия.
11. Спектроскопия электронных потерь энергии.
12. Вторично-ионная масс-спектроскопия.
13. Резерфордское обратное рассеяние.
14. Спектрометрия атомов отдачи, вылетающих вперед.
15. Рассеяние ионов низких энергий.
16. Анализ выхода ядерных реакций.
17. Электронный микроанализ.
18. Анализ выхода рентгеновского излучения, возбуждаемого быстрыми ионами.
19. Рентгеновская флуоресцентная спектроскопия полного отражения

Методические рекомендации по организации и выполнению самостоятельной работы студентов

При изучении дисциплины рекомендуется использовать следующие формы самостоятельной работы:

- решение индивидуальных заданий (задач);
- подготовка рефератов по индивидуальным темам;
- подготовка сообщений, тематических докладов, презентаций по заданным темам;
- проработка тем (вопросов), вынесенных на самостоятельное изучение.

ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ УВО

Название учебной дисциплины с которой требуется согласование	Название кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы учреждения высшего образования по учебной дисциплине	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола) ¹
Согласование не требуется	Кафедра «Микро- и нано-техники»		Содержание данной учебной программы не требует согласования с другими учебными дисциплинами специальности. Протокол № 3 от 22.11.2022 г.)

¹ При наличии предложений об изменениях в содержании учебной программы учреждения высшего образования по учебной дисциплине.