

Химия поверхности твёрдых тел

к.х.н. Нартова Анна Владимировна.

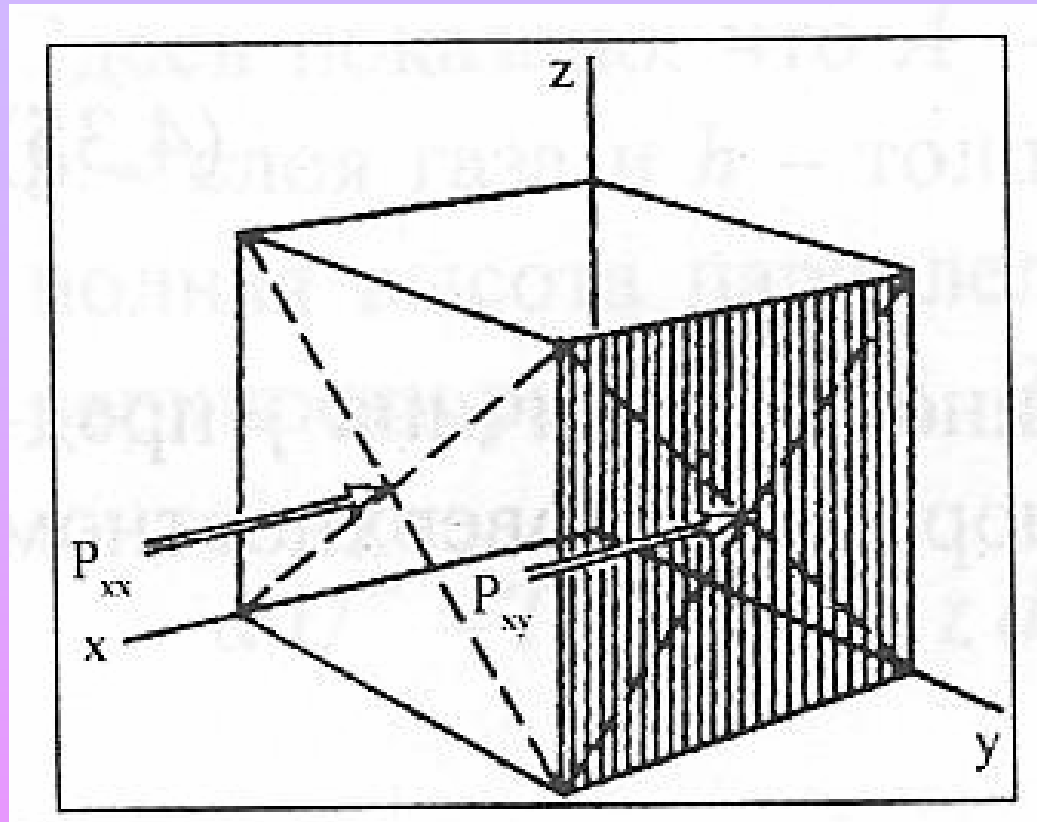
Наука о поверхности (Surface Science)

Поверхность - граница раздела двух сред.

Для изучения поверхности необходимо рассматривать ее в совокупности с обеими фазами, границей между которыми она является! [1]

[1] Лифшиц В.Г., Репинский С.М. Процессы на поверхности твердых тел. Владивосток: Дальнаука. 2003. 704 с.

Поверхностное натяжение



Компонента давления P_{xx} есть сила, приложенная в направлении оси x к единичной площадке на плоскости, нормаль к которой направлена по оси x ; компонента давления P_{xy} есть сила, приложенная в направлении оси x к единичной площадке на плоскости, нормаль к которой направлена по оси y .

$$P_T = P_{xx} = P_{yy}$$
$$P_N = P_{zz}$$

Поверхностное
натяжение

$$\sigma \equiv \int_{-\infty}^{\infty} (P_N - P_T) dz$$

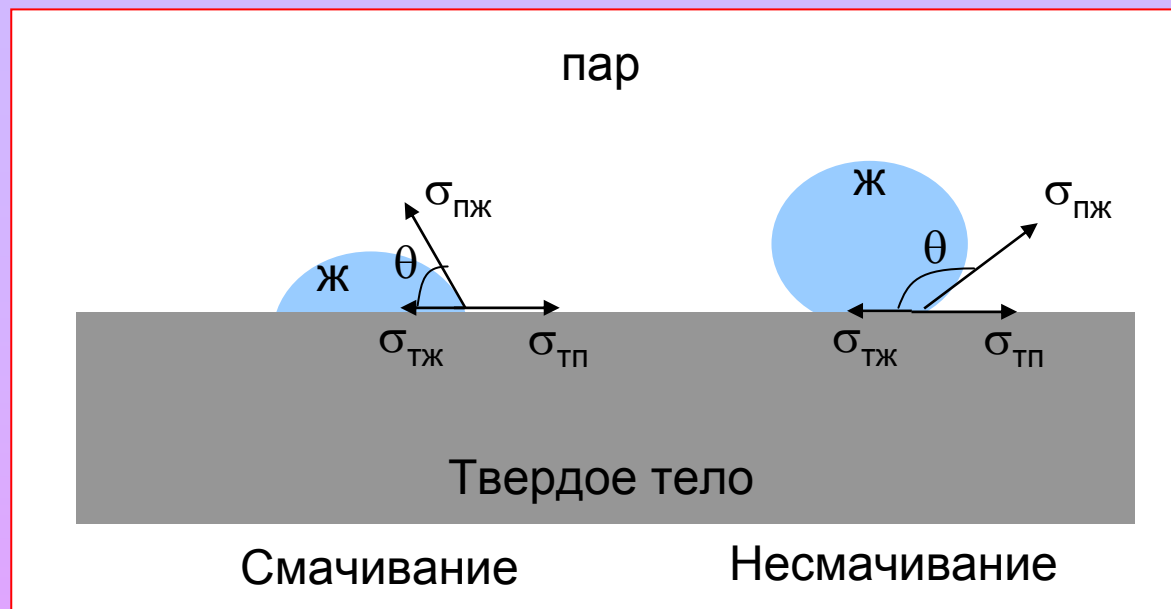
Поверхностное натяжение

-Обусловлено различием сил межмолекулярного взаимодействия на границе раздела двух фаз, благодаря чему в тонком пограничном слое появляется нескомпенсированная свободная **поверхностная энергия**.

-Удельная поверхностная энергия эквивалентна **работе**, расходуемой на обратимое изотермическое образование единицы площади свободной поверхности (Дж/м²).

-Удельная поверхностная энергия численно совпадает с **коэффициентом поверхностного натяжения** (Н/м).

Капля жидкости на плоской поверхности



Минимизация суммарной поверхностной энергии:

$$\sigma_{\text{ТЖ}} A_{\text{ТЖ}} + \sigma_{\text{ПЖ}} A_{\text{ПЖ}} + \sigma_{\text{ТП}} A_{\text{ТП}} \Rightarrow \min$$

Равновесная величина контактного угла определяется уравнением Юнга-Дюпре:

$$\sigma_{\text{ТП}} = \sigma_{\text{ТЖ}} + \sigma_{\text{ПЖ}} \cos \theta$$

Контактный угол:

$$\cos \theta = (\sigma_{\text{ТП}} - \sigma_{\text{ТЖ}}) / \sigma_{\text{ПЖ}}$$

$$\theta < 90^\circ$$

смачивание

$$\theta > 90^\circ$$

несмачивание

Когезия - Адгезия

Работа разрыва столбика жидкости единичного сечения

Фаза а = б



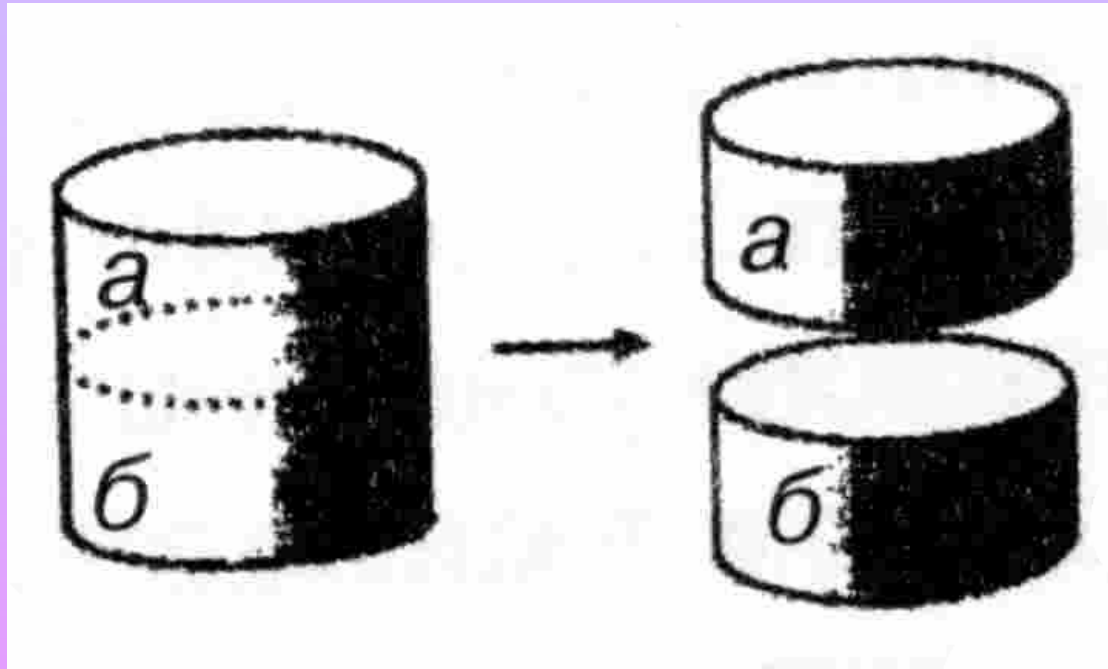
W_k - Работа когезии



$$W_k = 2\sigma_{пж}$$



Мера межмолекулярного взаимодействия в объеме гомогенной конденсированной фазы.



Фаза а ≠ б



W_a - Работа адгезии



$$W_a = \sigma_{пж} + \sigma_{тп} - \sigma_{тж}$$

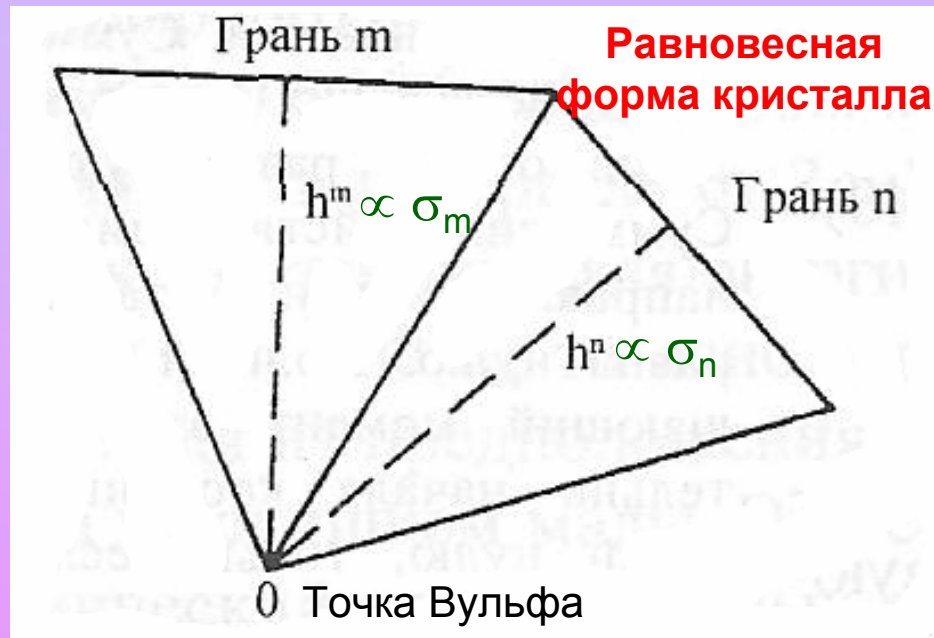


Мера интенсивности взаимодействия двух контактирующих фаз.

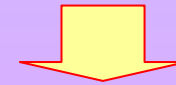
$$W_a/W_k = 0.5(1 + \cos\theta) \quad \text{или} \quad \cos\theta = 2W_a/W_k - 1 = W_a/\sigma_{пж} - 1.$$

Уравнение Вульфа

Габитус (habitus-внешность) - наружный вид кристаллов, определяемый преобладающим развитием граней тех или иных простых форм.

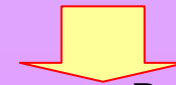


Анизотропия поверхностной энергии граней



Условие минимизации избыточной энергии:

$$F_s = \sum \sigma_i A_i \Rightarrow \min$$



Уравнение Вульфа
(правило Кюри-Вульфа или Гиббса-Вульфа)

$$\sigma_1/h_1 = \sigma_2/h_2 = \sigma_3/h_3 = \dots = \sigma_i/h_i = \text{const}$$

- ✓ Площадь граней убывает с ростом их поверхностной энергией;
- ✓ Грани с наибольшим σ_i не развиваются, так как они термодинамически неустойчивы.

Уравнение Вульфа

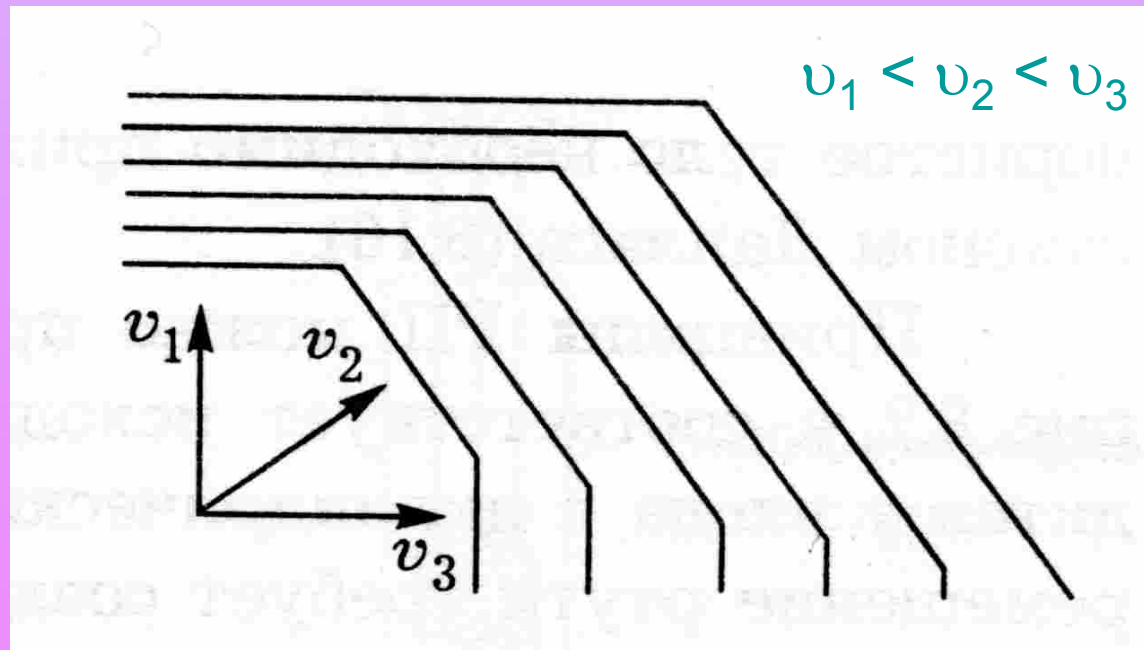
В ходе роста кристалла кристаллизация в первую очередь происходит на неустойчивых гранях (с большими значениями σ), а наложение на стабильных гранях отстает.



Менее устойчивые грани исчезают, а стабильные увеличиваются в размерах.



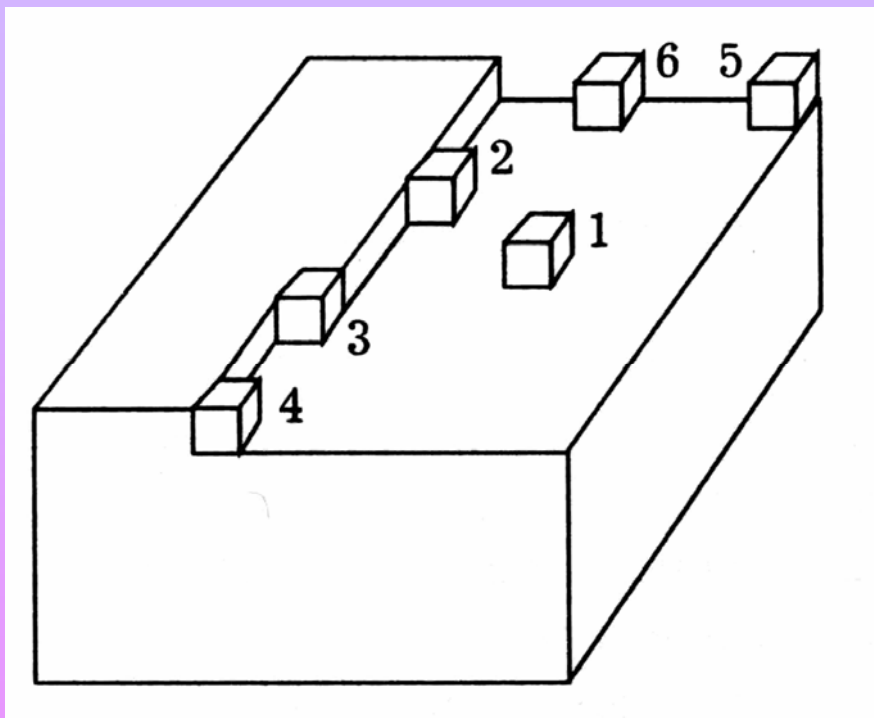
В итоге поверхность кристалла образована гранями с наименьшей скоростью роста.



Особенности роста кристаллических частиц

Система: «хозяин» - поверхность кристалла того же вещества.

Классическая теория роста кристаллов Косселя-Странского

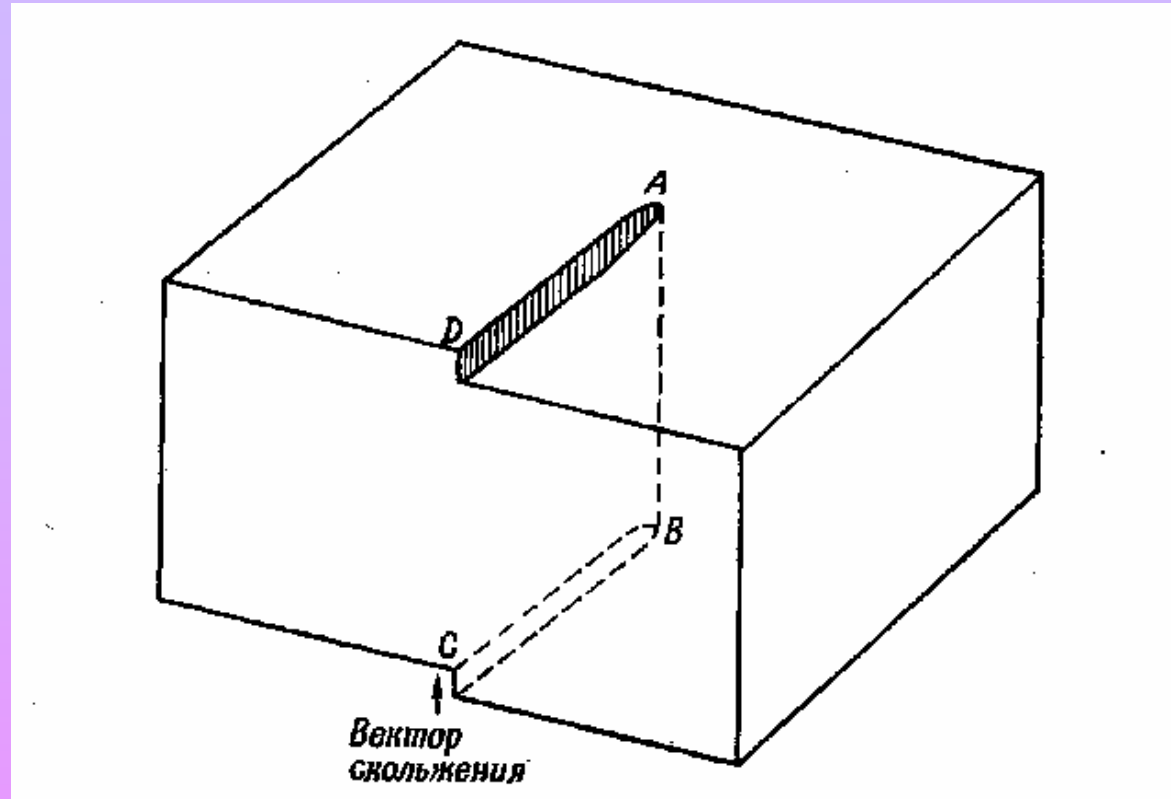


Различные места осаждения элементов ионной решетки NaCl. Выделение энергии φ_n при осаждении в местах типа n (в отн.ед.):
 $\varphi_1=1.0$, $\varphi_2=2.7$, $\varphi_3=13.2$, $\varphi_4=7.5$, $\varphi_5=3.7$, $\varphi_6=1.3$.

Медленный (квазиравновесный) рост монокристалла осуществляется путем последовательного наращивания монослоев на гранях, в результате эти грани передвигаются в направлении своих нормалей, оставаясь параллельными самим себе.

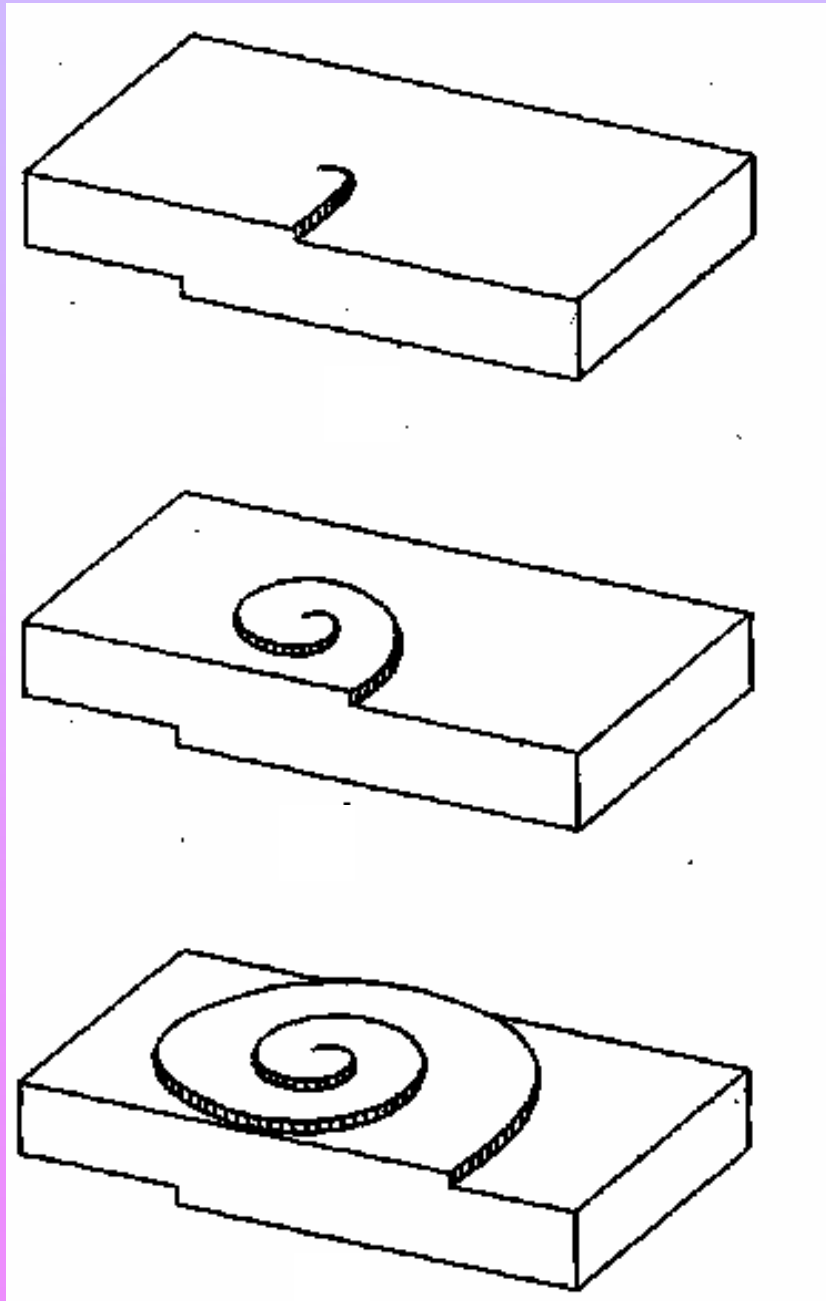
Форма монокристаллов стремится к равновесной по правилу Вульфа.

Образование винтовой дислокации



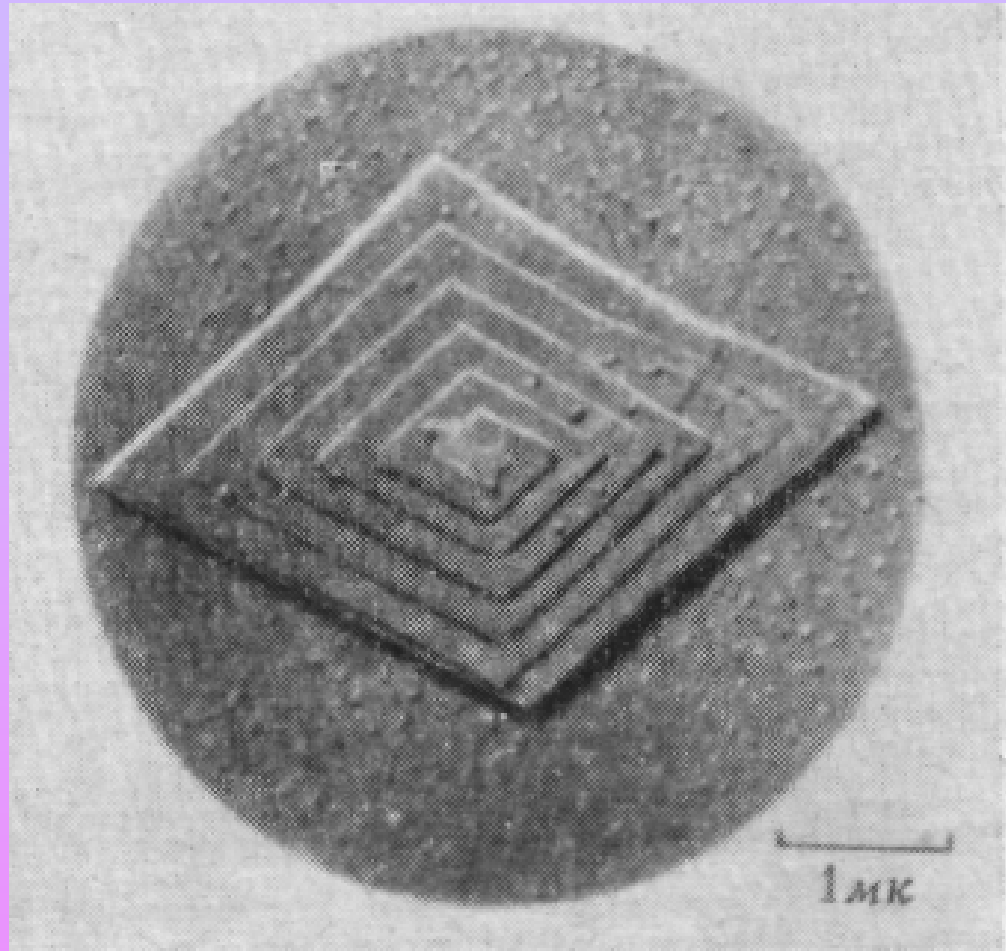
Скольжение произошло в плоскости $ABCD$ в направлении вектора скольжения. Дислокационная линия AB , которая показывает границу нарушений решетки, параллельна вектору скольжения.

Последовательные ступени роста по механизму винтовой дислокации



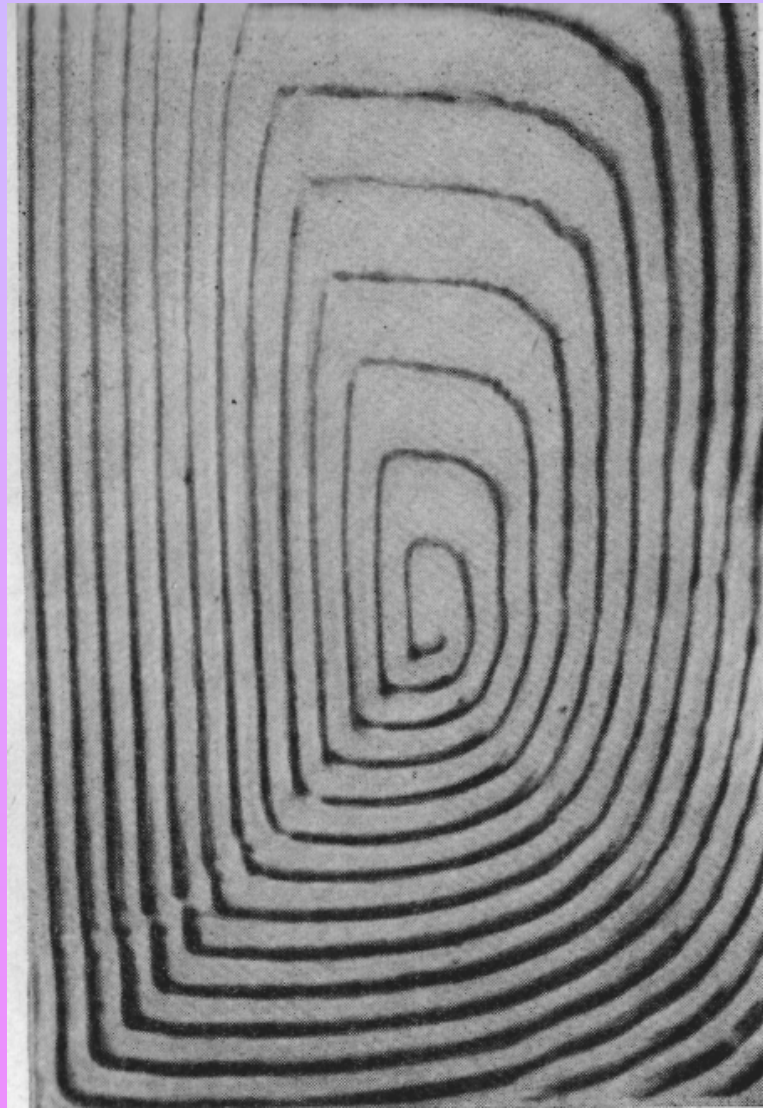
Видно, как ступень AD , закручивается в спираль, растущую вокруг начала дислокации.

Ступени роста по механизму винтовой дислокации



Спираль роста на грани кристалла n-парафина, образовавшаяся из одной винтовой дислокации.

Ступени роста по механизму винтовой дислокации

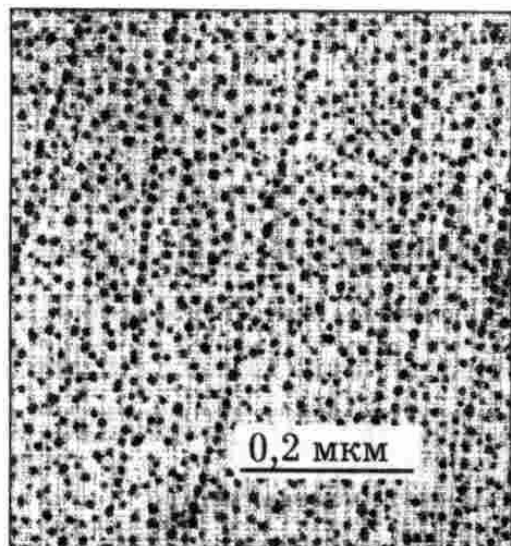


Спираль роста на грани (100) кристалла сахарозы.

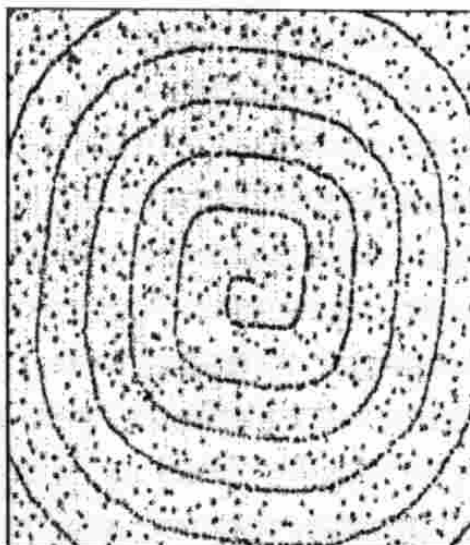
Особенности роста кристаллических частиц

Система: «хозяин» и «гость» различны по своей природе.

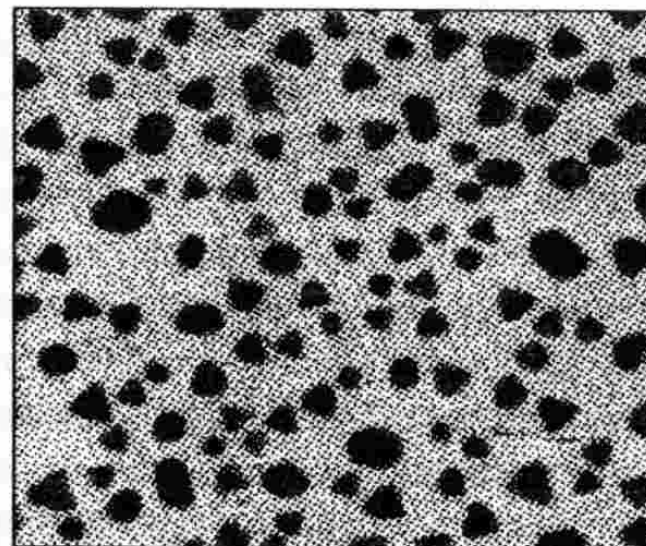
Au/NaCl
(напыление при 150°C)



Au/NaCl
(прогрев при 500°C)



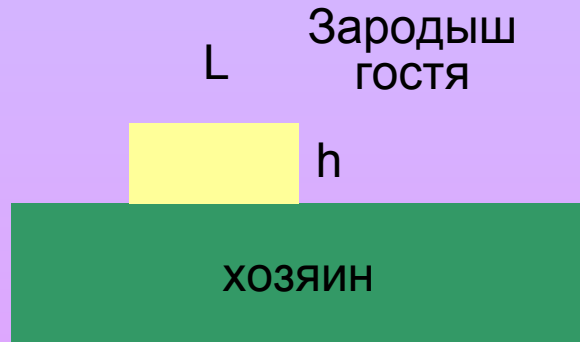
Pd/слюда
(напыление при 500°C)



Эпитаксия

Epi – над, сверху, *taxis* – расположение

- Ориентированный рост одного кристалла на поверхности другого.



Изменение термодинамического потенциала системы за счет образования зародыша гостя на поверхности хозяина:

$$\Delta G = -(L^2 h / v_g) \Delta \mu + L^2 \Delta W + 4 L h \sigma_{gc}$$

$$\Delta W = \sigma_{gc} + \sigma_{gx} - \sigma_{xc} = W_k - W_a$$

↑ ↑
Г/Г Г/Х

$$\Delta W < 0$$

Полное смачивание

$$\Delta W > 0$$

Плохое смачивание

$$\Delta W = 0$$

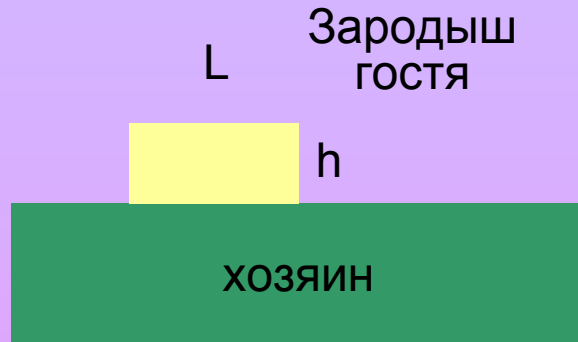
Идентичность свойств «гостя» и «хозяина»

Где *g* – «гость», *x* – «хозяин», *c* – «среда», v_g – мольный объем «гостя», $\Delta \mu$ – изменение химического потенциала.

Эпитаксия

Epi – над, сверху, *taxis* – расположение

- Ориентированный рост одного кристалла на поверхности другого.



Изменение термодинамического потенциала системы за счет образования зародыша гостя на поверхности хозяина:

$$\Delta G = -(L^2 h / v_g) \Delta \mu + L^2 \Delta W + 4 L h \sigma_{gc}$$

$$\Delta W = \sigma_{gc} + \sigma_{gx} - \sigma_{xc} = \underset{\substack{\uparrow \\ \Gamma/\Gamma}}{W_k} - \underset{\substack{\uparrow \\ \Gamma/X}}{W_a}$$

Равновесная форма зародыша из условия минимума поверхностной энергии:

$$h/L = \Delta W / W_k = 1 - W_a / W_k$$

Размер критического зародыша из условия минимума ΔG :

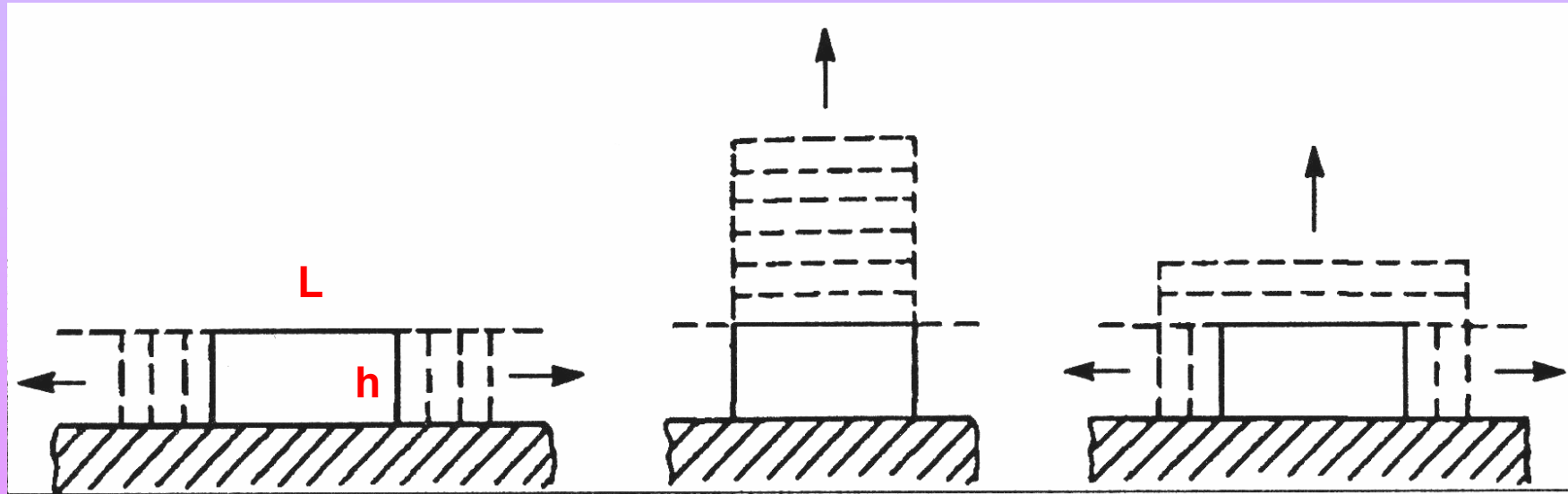
$$L_{кр} = 4 v_g \sigma_{gc} / \Delta \mu; \quad h_{кр} = 2 v_g \Delta W / \Delta \mu; \quad \Delta G_{кр} = 16 v_g \sigma_{gc}^2 \Delta W / \Delta \mu^2$$

Если хозяин и гость имеют кубическую решетку с одинаковым межатомным расстоянием a :

$$\Delta W = (e_{\Gamma\Gamma} - e_{\Gamma X}) / a^2$$

Где $e_{\Gamma\Gamma}$ – энергия взаимодействия между атомами гостя, $e_{\Gamma X}$ – энергия адсорбционного взаимодействия гость – хозяин.

Характерные случаи роста зародыша



Латеральный

Нормальный

Рост с сохранением
равновесной формы

Механизмы формирования частиц или пленок “гостя”, нанесенного на поверхность “хозяина”

Механизм Франка-ван-дер-Мерве (Frank-van der Merve, FM):

- ✓ Послойный рост полимолекулярных (полиатомных) пленок;
- ✓ $\Delta W < 0$;
- ✓ Не требует пересыщения;
- ✓ $\nu_r \Delta W / a \approx e_{гг}$ и $e_{гг} < \Delta\mu < 0$.

Реализуется для пар изоструктурных металлов (Au/Ag, Fe/Au) и полупроводников с очень близкими параметрами решеток.

[1] Фенелонов В.Б. Введение в физическую химию формирования супрамолекулярной структуры адсорбентов и катализаторов. – Новосибирск: Из-во СО РАН, 2002, - 414 с.

[2] Промышленный катализ в лекциях № 2. 2005. Под ред. проф. А.С. Носкова. – М.: Калвис, 2005.-128 с.

Механизмы формирования частиц или пленок “гостя”, нанесенного на поверхность “хозяина”

Механизм Фолмера – Вебера (Vollmer – Weber, VW):

- ✓ Механизм роста островков;
- ✓ $\Delta W \geq 0$;
- ✓ Необходимо пересыщения;
- ✓ Δa – разница значений параметров решетки. Эпитаксия улучшается с уменьшением величины $\zeta = 1 + a_x / \Delta a$, где a_x – параметр решетки хозяина.

Осаждение благородных металлов на поверхности щелочно-галогидных кристаллов и других солей, поверхности оксидов и графита.

[1] Фенелонов В.Б. Введение в физическую химию формирования супрамолекулярной структуры адсорбентов и катализаторов. – Новосибирск: Из-во СО РАН, 2002, - 414 с.

[2] Промышленный катализ в лекциях № 2. 2005. Под ред. проф. А.С. Носкова. – М.: Калвис, 2005.-128 с.

Механизмы формирования частиц или пленок “гостя”, нанесенного на поверхность “хозяина”

Механизм Странского - Крастанова (Stransky – Krastanov, SK):

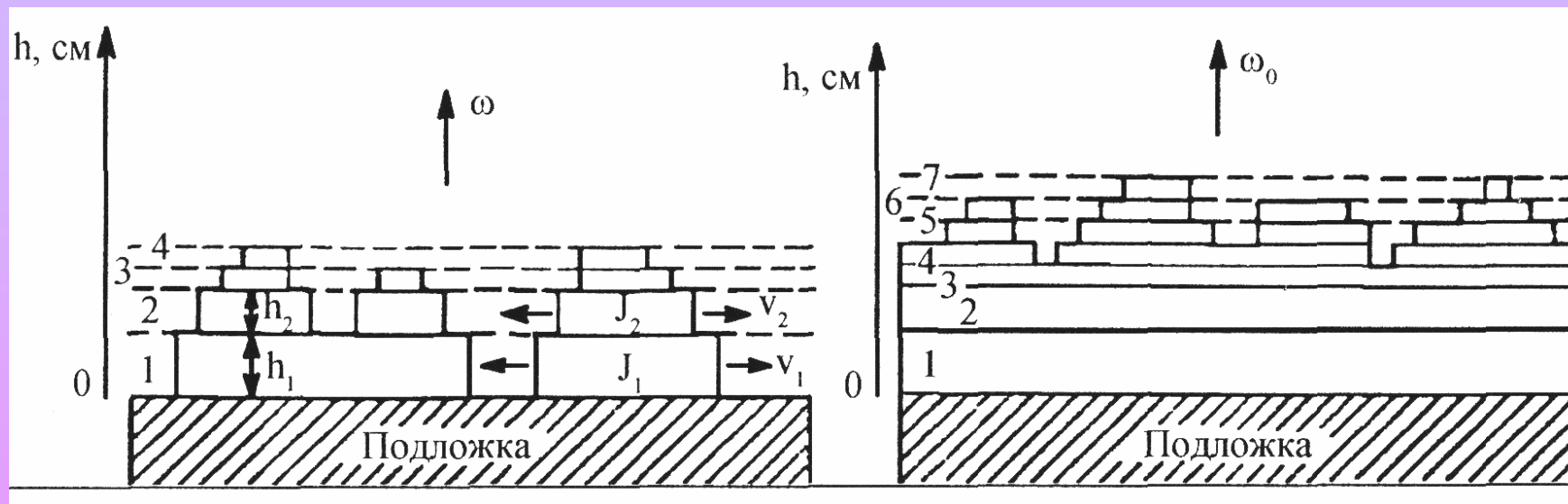
- ✓ Механизм роста «слой плюс островки»;
- ✓ $\Delta W < 0$ для первого слоя, но адгезия трехмерных частиц существенно меньше и $\Delta W > 0$.

Осаждение Ag или Au на Si(111).

[1] Фенелонов В.Б. Введение в физическую химию формирования супрамолекулярной структуры адсорбентов и катализаторов. – Новосибирск: Из-во СО РАН, 2002, - 414 с.

[2] Промышленный катализ в лекциях № 2. 2005. Под ред. проф. А.С. Носкова. – М.: Калвис, 2005.-128 с.

Процесс слоевого роста



Начальная стадия

Стадия продолжающегося роста

Кристаллография: объем - поверхность

Строение поверхности твердого тела можно рассматривать исходя из особенностей строения объемной фазы.

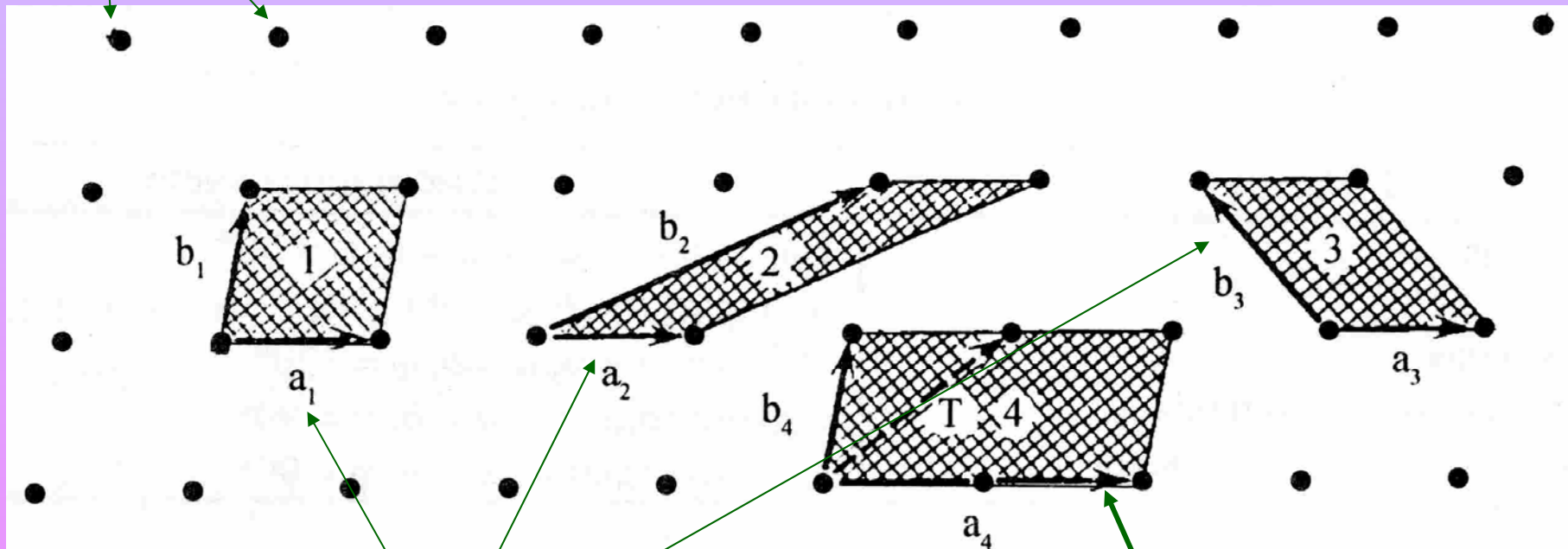
Строение поверхности твердого тела определяется однозначно лишь как граница раздела для данных контактирующих фаз:
твердое тело / вакуум; твердое тело / газ...

К.Кэмболл (1970 г): Изучая монокристаллы в условиях СВВ – можно оказаться заточенным в башне из «слоновой кости».

Структурная примитивная ячейка

Точки двумерной кристаллической решетки

Вектор трансляции кристаллической решетки
 $T = I_1 a_i + I_2 b_i$, где I_1 и I_2 целые числа.



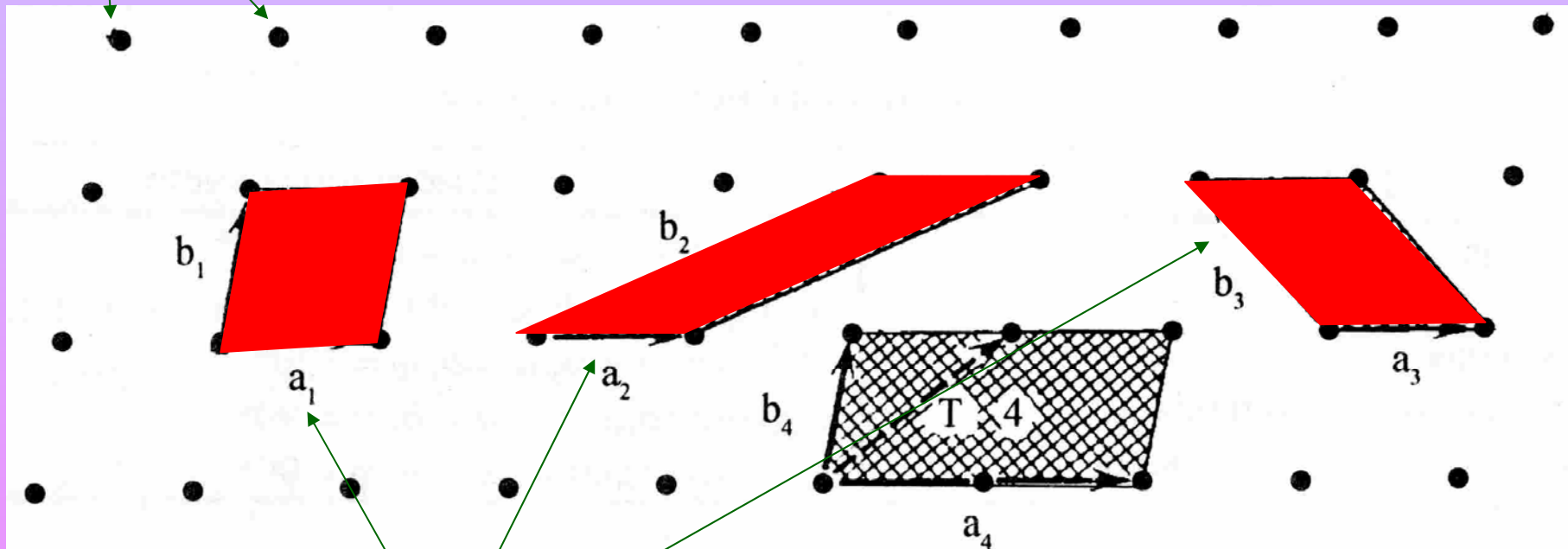
a_i и b_i – векторы трансляции решетки

a_4 и b_4 – не являются примитивными

Структурная примитивная ячейка

Точки двумерной кристаллической решетки

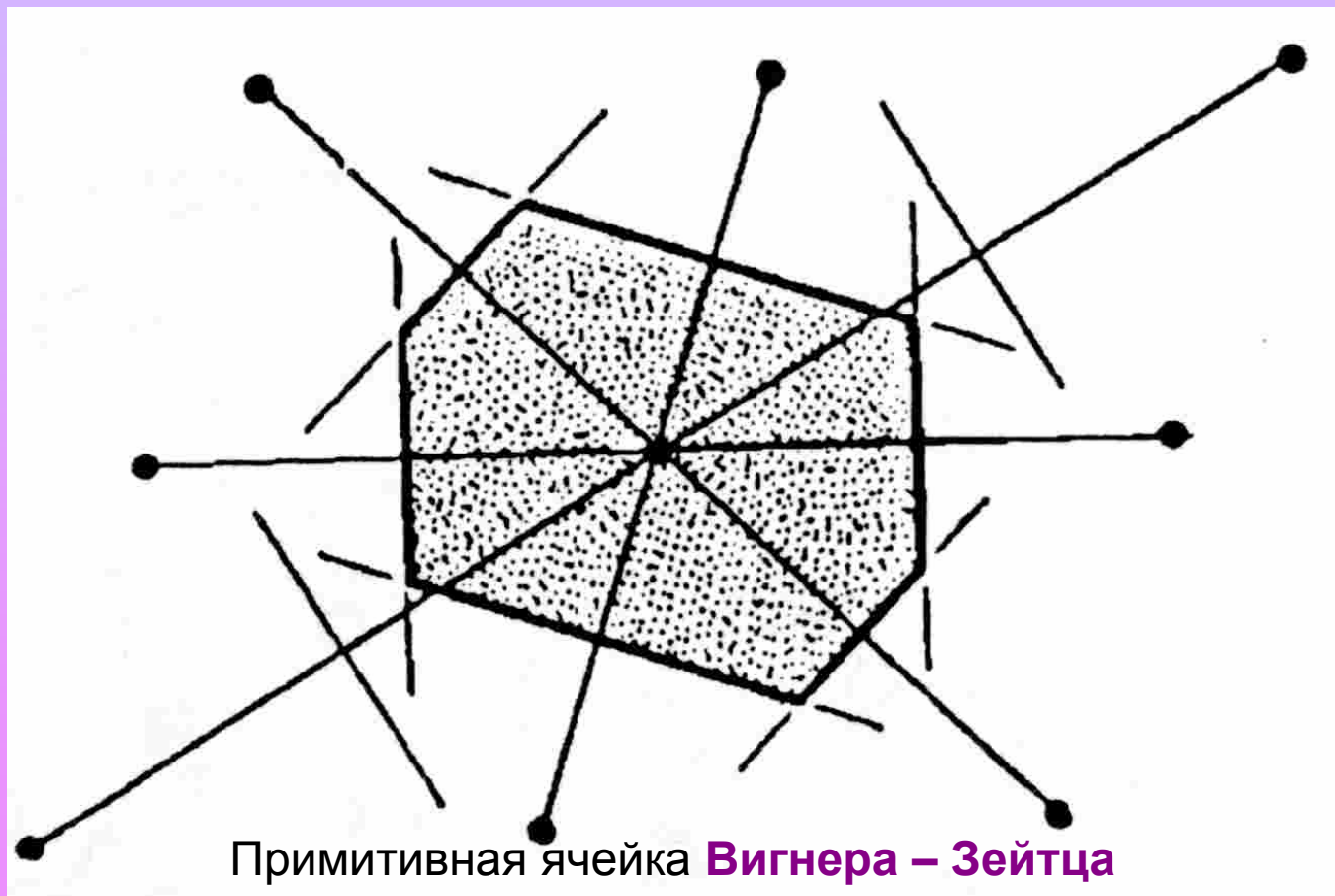
Вектор трансляции кристаллической решетки
 $T = I_1 a_i + I_2 b_i$, где I_1 и I_2 целые числа.



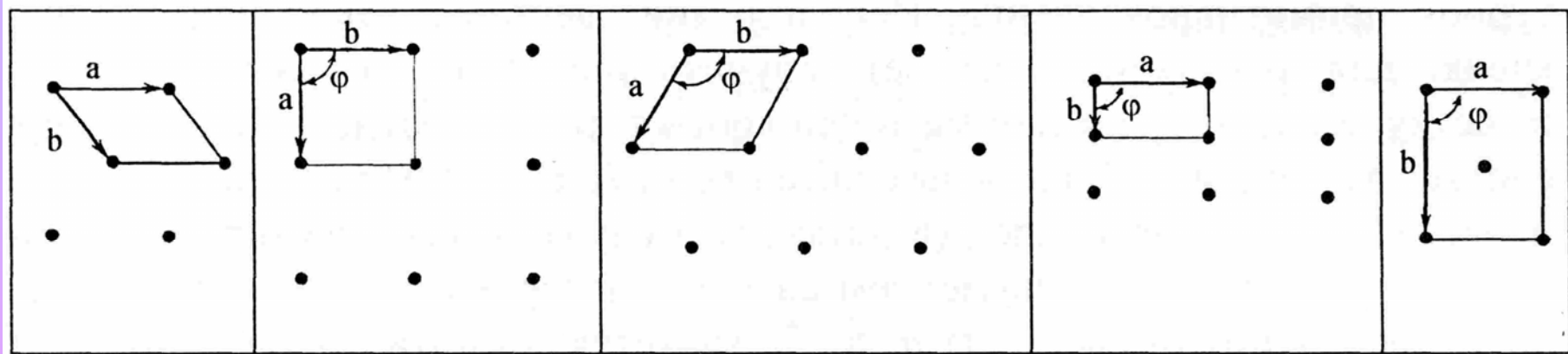
Плоские примитивные ячейки – использование векторов таких примитивных ячеек для трансляции позволяет получить примитивную кристаллическую решетку.

Выбор примитивной ячейки (двумерный случай)

Примитивная ячейка – простейший параллелограмм с минимальной площадью, имеющий в качестве сторон векторы \mathbf{a} и \mathbf{b} .



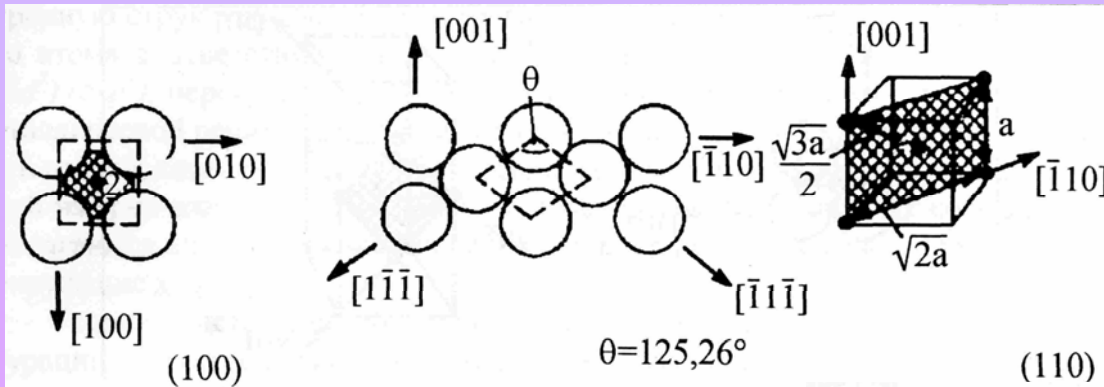
Двумерные решетки Браве, используемые для описания поверхностных структур



| Решетка | Элементарная ячейка |
|------------------------------|---|
| Косоугольная | Параллелограмм; $a \neq b$, $\varphi \neq 90^\circ$ |
| Квадратная | Квадрат; $a = b$, $\varphi = 90^\circ$ |
| Гексагональная | 60° -ный ромб; $a = b$, $\varphi = 120^\circ$ |
| Примитивная прямоугольная | Прямоугольник; $a \neq b$, $\varphi = 90^\circ$ |
| Центрированная прямоугольная | Прямоугольник; $a \neq b$, $\varphi = 90^\circ$ |

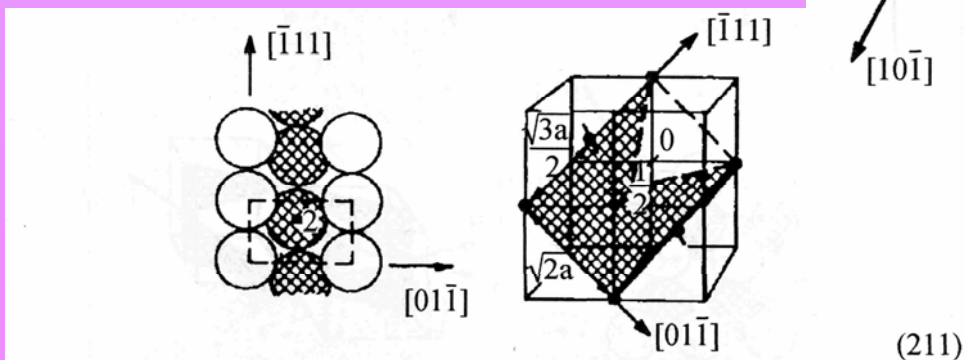
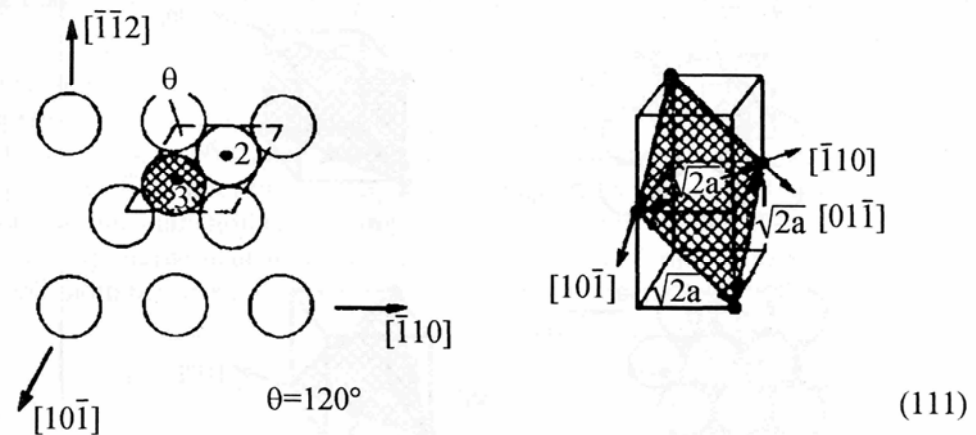
Металлы

Металлы кристаллизуются в плотных упаковках: объемно и гранецентрированной кубической и гексагональной решетках.



Модель жестких плотноупакованных шаров

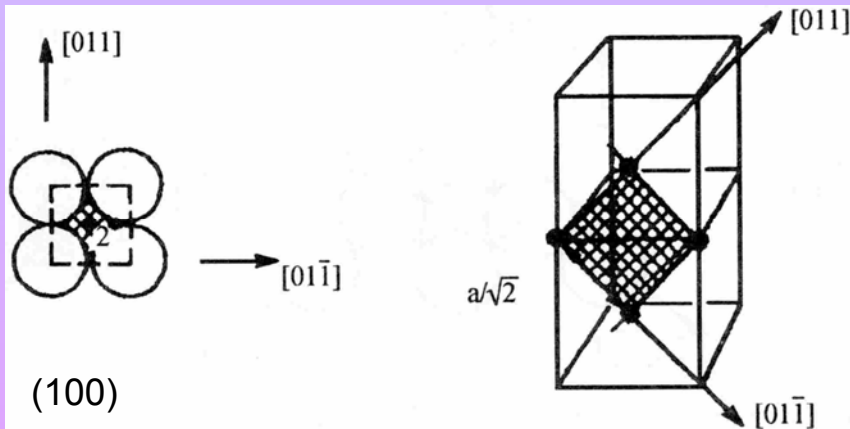
Расположение атомов на низкоиндексных плоскостях в объемно-центрированной решетке.



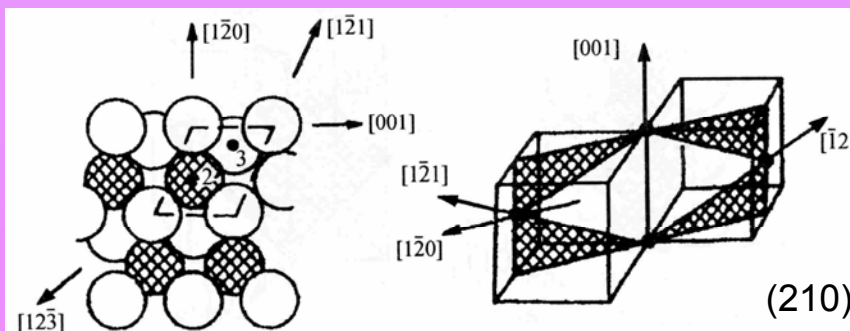
Штрихами показана примитивная поверхностная ячейка

Металлы

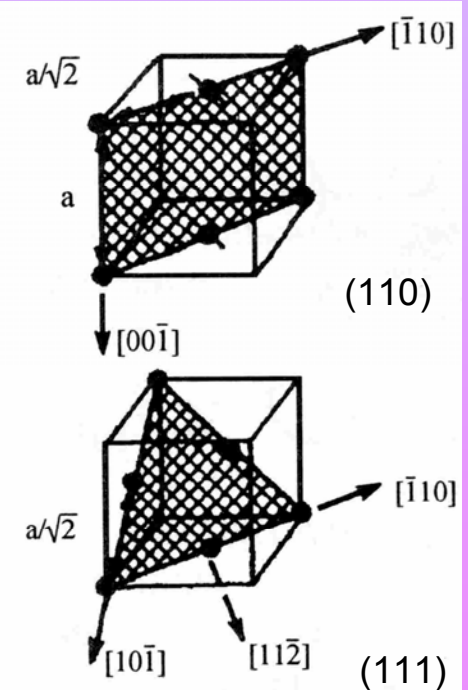
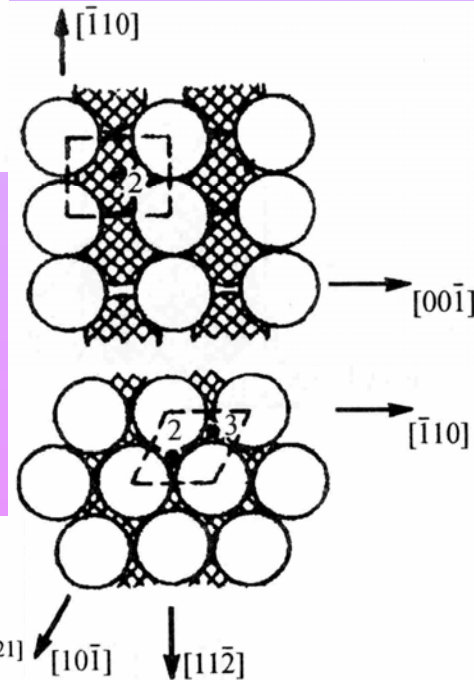
Металлы кристаллизуются в плотных упаковках: объемно и гранецентрированной кубической и гексагональной решетках.



Расположение атомов на низкоиндексных плоскостях в грани-центрированной решетке.



Модель жестких плотноупакованных шаров



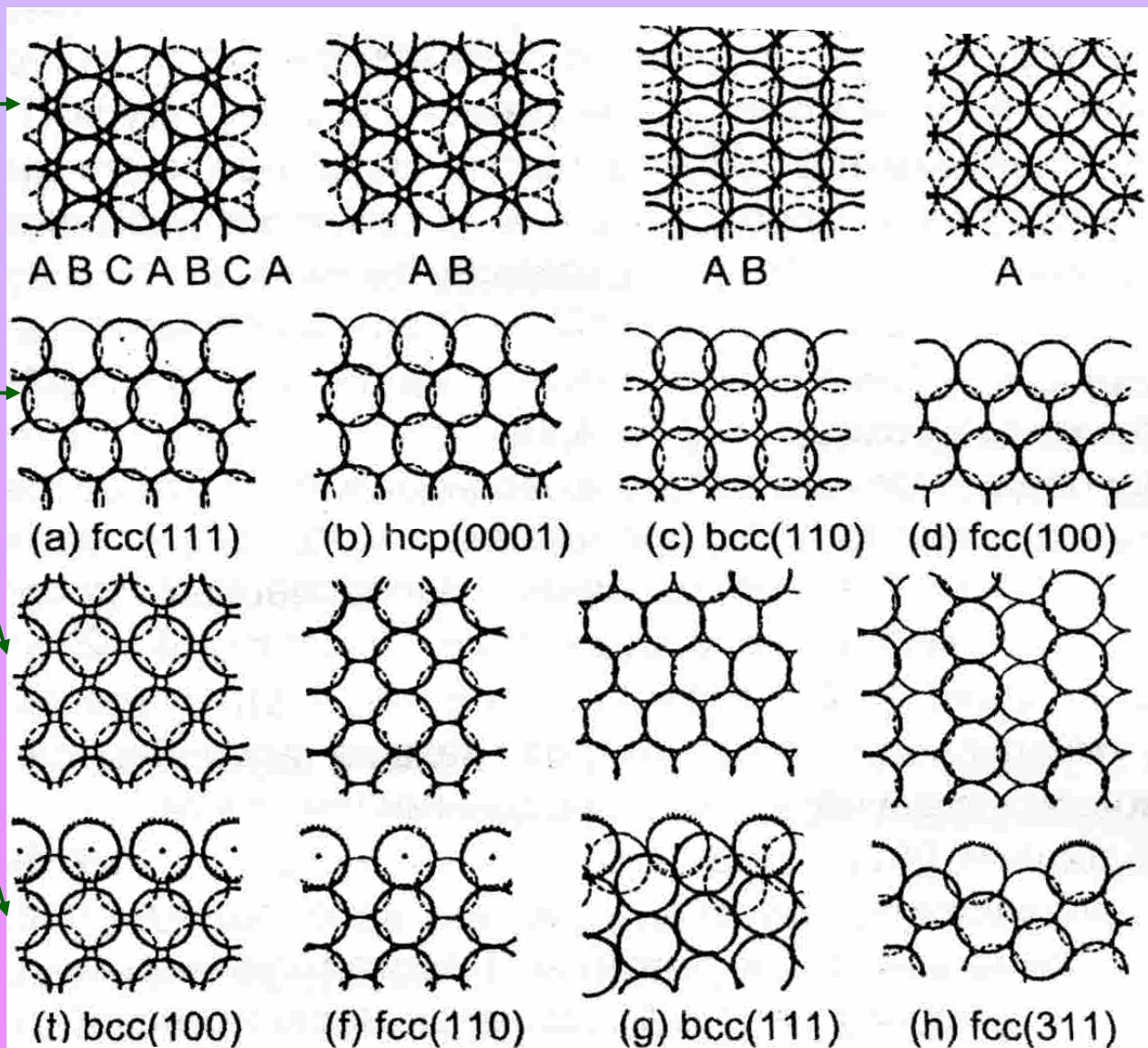
Штрихами показана примитивная поверхностная ячейка

Металлы

Идеальные поверхности с малыми индексами

вид
сверху

вид
сбоку



Металлы

Модель жестких сфер

Выполняется

Не выполняется

Элементарные ячейки на поверхности идентичны соответствующим плоскостям в объеме кристалла

Перестройка поверхностного слоя атомов относительно объема

Симметрия поверхностной ячейки не изменяется, но наблюдается смещение поверхностных атомов.

Cu, Ni, W

Al, Mo

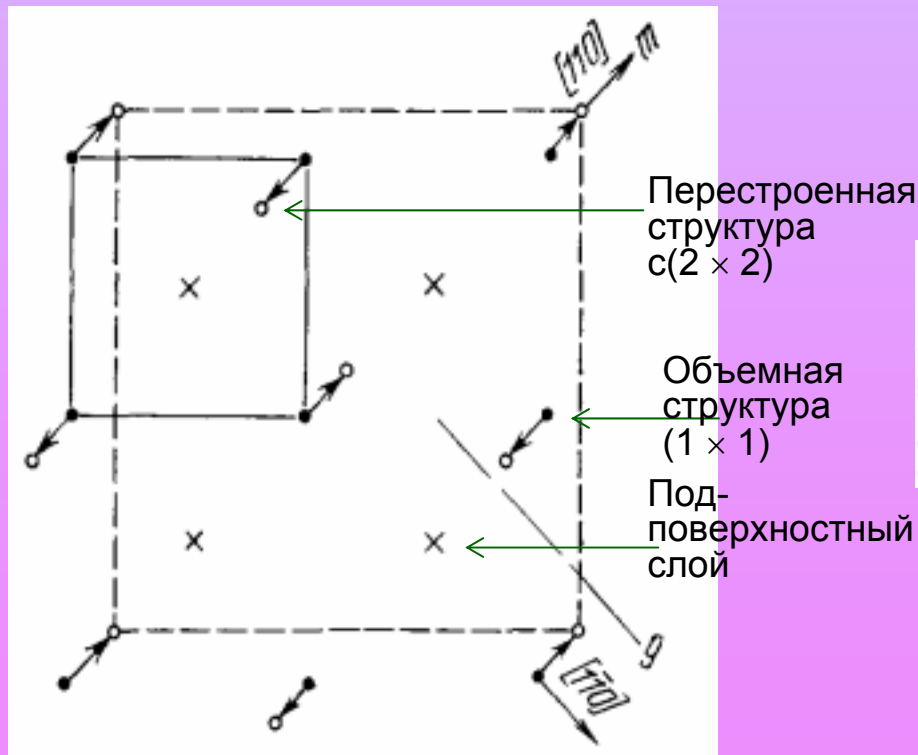
Au, Pt, Ir

ДМЭ

Металлы

Реконструкция поверхности

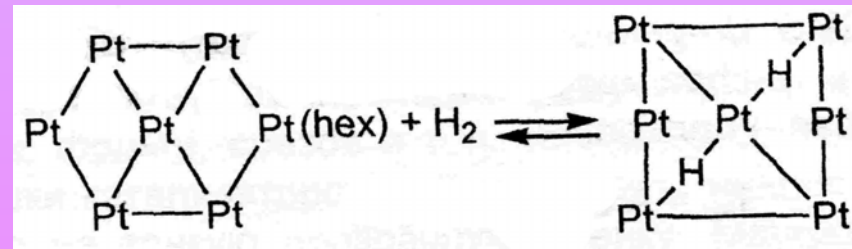
| | Объем | Поверхность |
|-----------|---|------------------------|
| Au | квадратичная структура (100) | гексагональная (100) |
| Si | алмазоподобная тетрагональная структура | сверхструктура (7 × 7) |



(100) W – $c(2 \times 2)$

Двумерные фазовые превращения

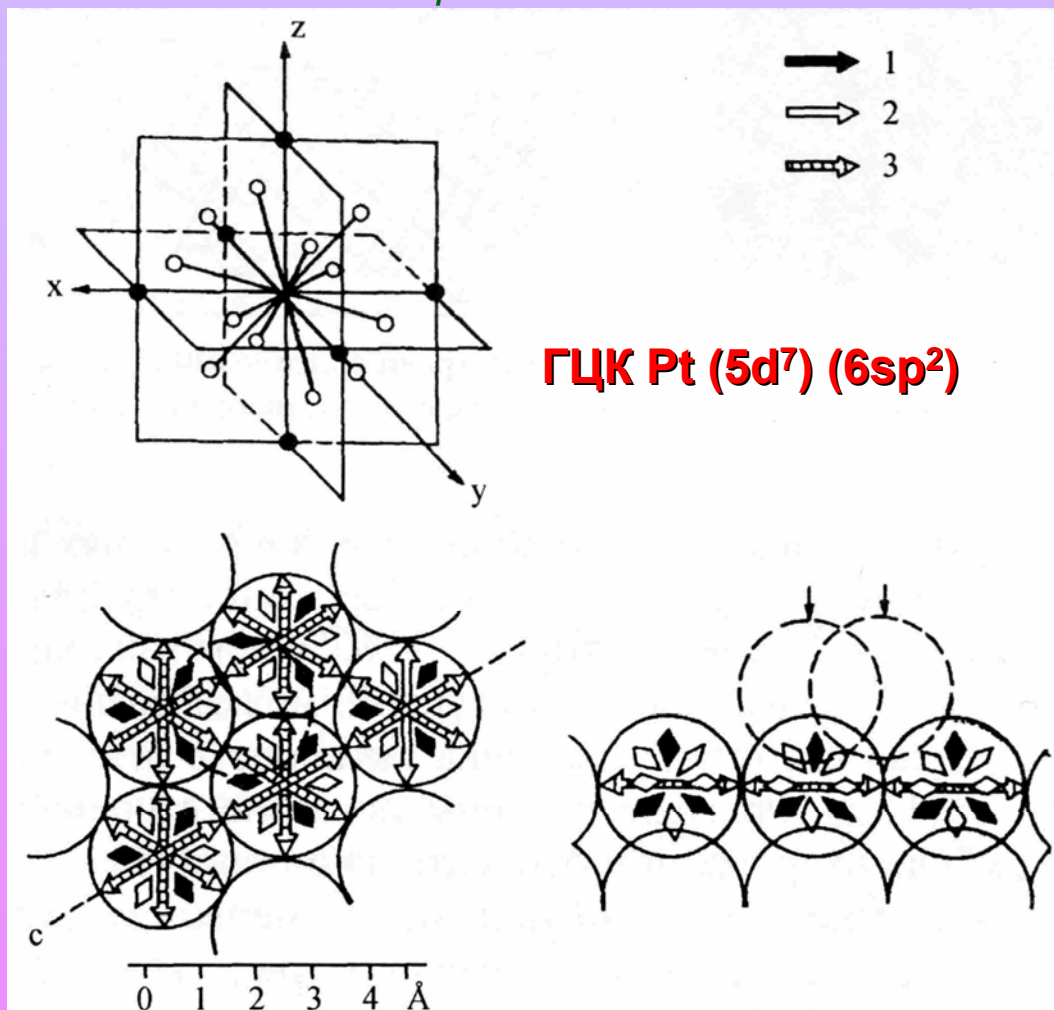
Pt(100)



Pt(1 × 1)

Металлы

Схематическое представление орбиталей
поверхностного атома на плоскости (111) ГЦК
решетки



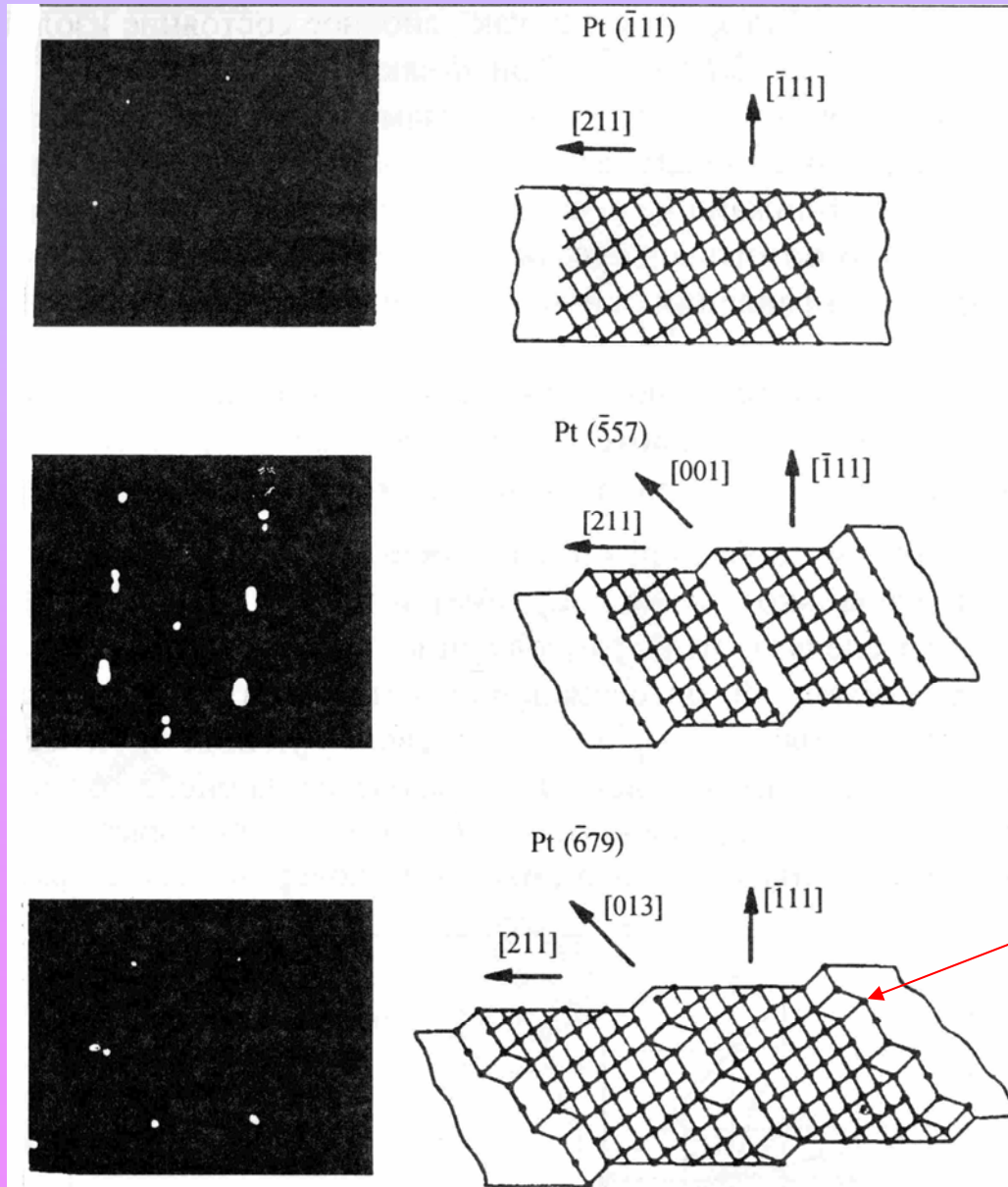
- 1- орбитали, выходящие под углом $35^{\circ}16'$ к плоскости
- 2 - орбитали, выходящие под углом $54^{\circ}44'$ к плоскости
- 3 - связывающие орбитали, лежащие в плоскости поверхности

Различие адсорбционного, каталитического и реакционного поведения.

Кристаллическое строение грани кристалла металла определяет направленность орбиталей поверхностных атомов.

Изменение взаимодействия атомов поверхностного слоя, как результат, перегруппировка поверхностных атомов с образованием наиболее устойчивой конфигурации.

Металлы



Атомное строение грани Pt(111)

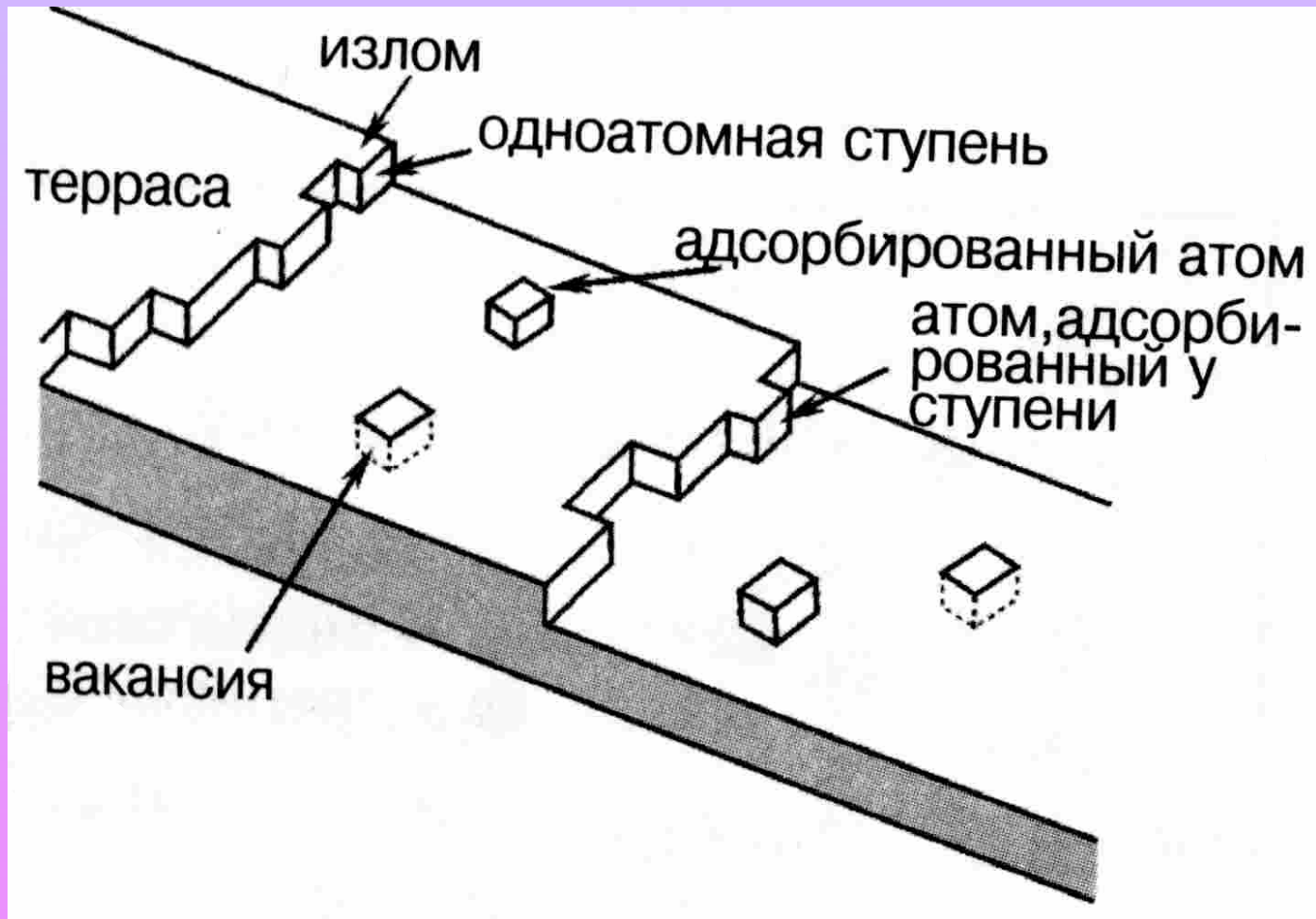
Грань с атомными ступенями

Узлы - кинки

Грань с изломами в атомных ступенях: Pt $7(111) \times (310)$

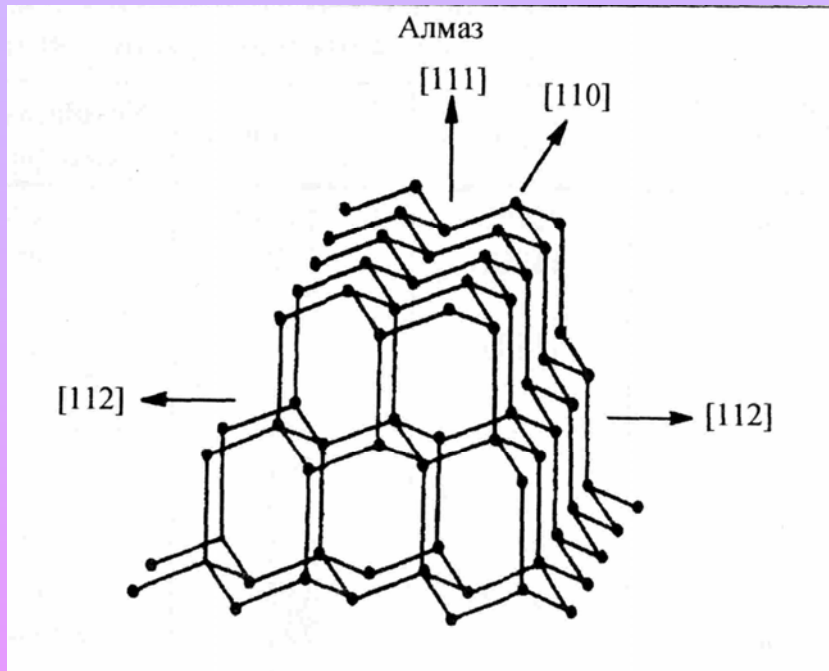
Металлы

«Реальная» поверхность металла

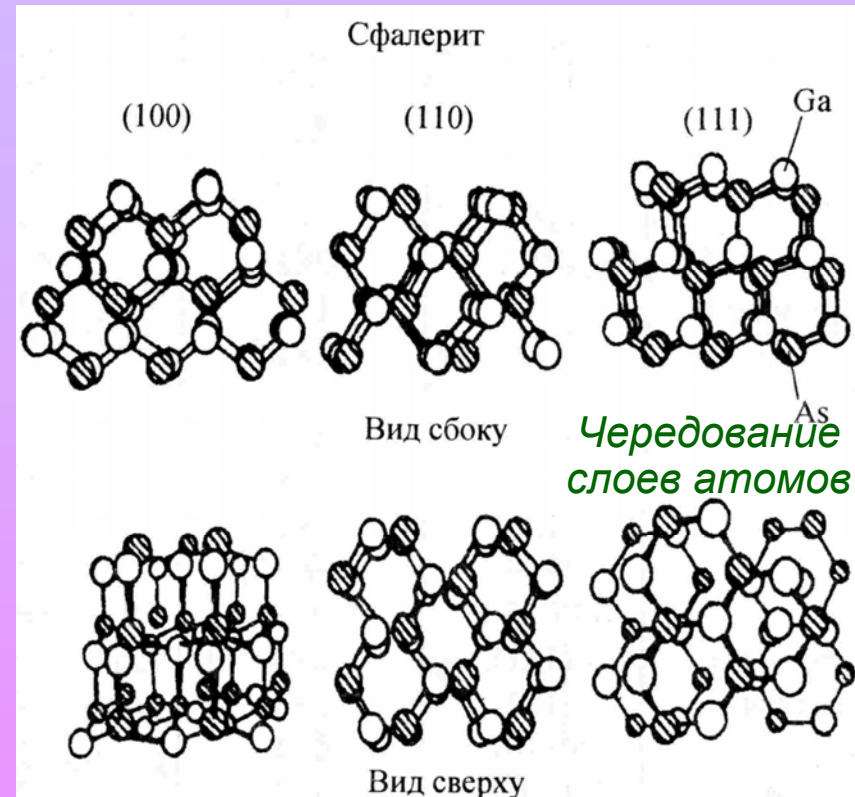


Ковалентные кристаллы

C ($2s^2 2p^3$)



Соединения элементов III и V, II и VI групп:
GaAs, InSb, ZnS, CdTe.



2 связи

1 связи

3 связи

Изменение характера
химической связи
поверхностных атомов

Поверхностные атомы имеют связь с
атомами из нижележащего слоя

Ковалентные кристаллы

Элементарные ячейки для поверхностей ковалентных кристаллов по данным ДМЭ

| Кристалл | Грань | Тип ячейки | Устойчивость до температур, °С | Примечание |
|----------------|----------|------------|--------------------------------|---|
| Алмаз | (111) | 1×1 | 900 | Образуется при сколе. При нагревании необратимо переходит в (7×7) Структуры обратимы при нагреве и охлаждении Структуры обратимо переходят при нагреве и охлаждении |
| | (100) | 2×2 | >900 | |
| | | 2×1 | – | |
| Кремний | (111) | 2×1 | 210 | |
| | (100) | 7×7 | 870 | |
| | | 1×1 | >870 | |
| | | 2×1 | 1100 | |
| | | 4×5 | 600 | |
| | | 2×1 | 600 – 750 | |
| | (110) | 5×1 | >750 | |
| | | 3×1 | 620 | |
| | | 3×2 | 750 | |
| | | 2×4 | – | |
| | | 13×2 | 800 | |
| | | 1×2 | 700 | |
| | | 2×2 | 850 | |
| | | 1×1 | 130 | |
| | Германий | (111) | 2×1 | – |
| 2×8 | | | >130 | |
| (100) | | 2×1 | – | |
| (110) | | c (8×10) | – | |
| (17 15 1) | | 2×1 | – | |
| Арсенид галлия | | (111) | 2×2 | – |
| | | (111) | 3×3 | 520 |
| | (110) | 1×1 | – | |
| | (100) | 1×1 | – | |
| | (100) | 6×6 | – | |
| | | 8×8 | – | |

Ковалентные кристаллы

По данным ДМЭ:

- ✓ Структура поверхностных слоев, как правило, отлична от соответствующих плоскостей в объеме кристалла;
- ✓ Несмотря на тождественность структуры объема кристаллов алмаза, кремния и германия, строение их поверхности различно;
- ✓ Для большинства поверхностных структур наблюдаются взаимные переходы при изменении температуры, своеобразные «двумерные фазовые переходы» двух типов: порядок – беспорядок и порядок – порядок.

Поверхность ионных кристаллов

Наиболее характерные структуры ионных кристаллов

Поверхность: изменение симметрии кристаллического поля на поверхности ионных кристаллов.

Смещение ионов из своих положений, характерных для параллельных плоскостей в объеме кристалла.

Характерное смещение

Катионы в глубь
кристалла

Анионы наружу
кристалла

Поверхность ионных кристаллов

Расчет смещений ионов, нормальных к идеальной плоскости (100), в единицах расстояния между ближайшими соседями.

| Соединение | Смещение | |
|------------|----------|---------|
| | катионы | анионы |
| LiF | -0.0697 | 0.0014 |
| NaF | -0.0393 | -0.0217 |
| NaCl | -0.0871 | 0.0356 |
| NaBr | -0.1147 | 0.0727 |
| NaI | -0.1395 | 0.0947 |
| KF | -0.0133 | -0.0335 |
| KCl | -0.0335 | -0.0047 |
| KBr | 0.0465 | 0.0021 |
| KI | -0.0647 | -0.0229 |

- смещение в объем.

Поверхность ионных кристаллов

Вдали от ОК:

В приповерхностном слое энергия взаимодействия ионов отличается от таковой в объеме.

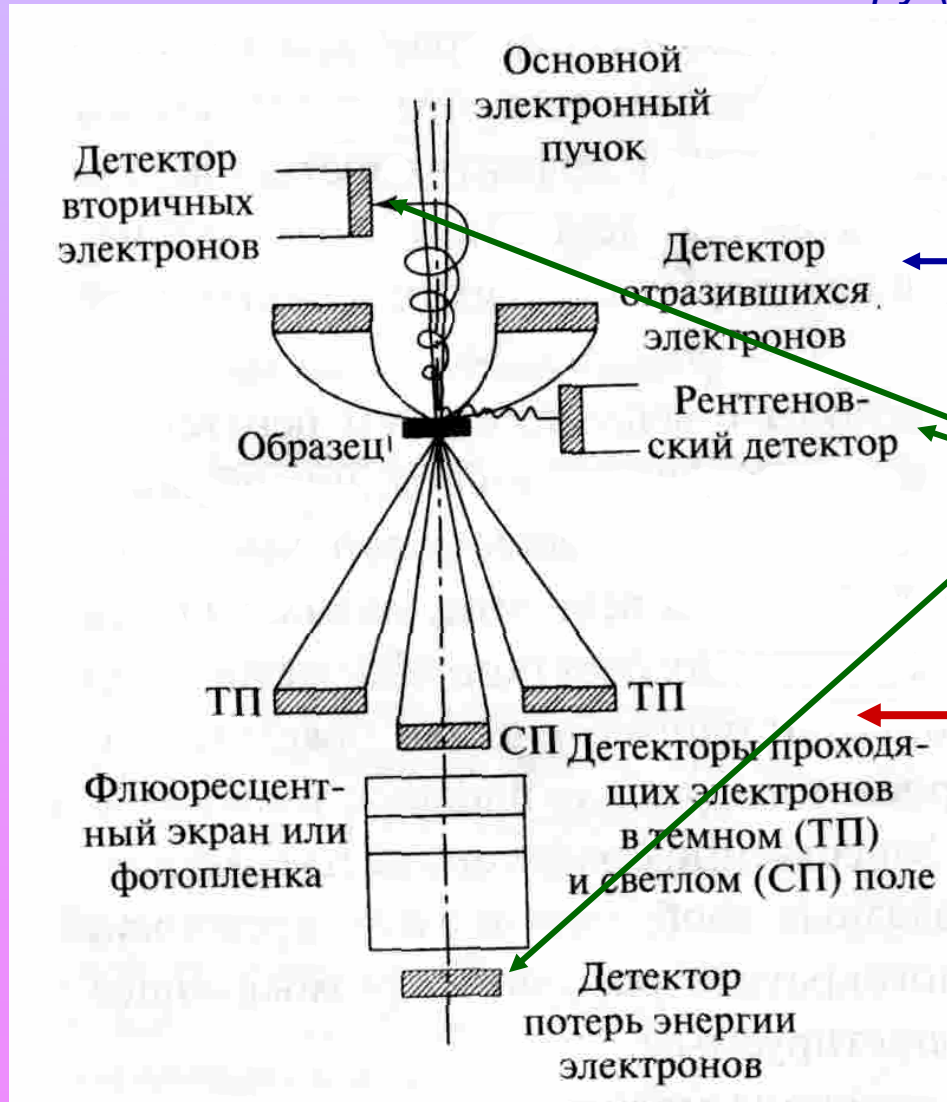
Перераспределение дефектов в приповерхностном слое.

Скопление вакансий положительного знака в приповерхностном слое.

МИКРОСКОПИЯ

Электронная микроскопия (ЭМ) *Electron microscopy (EM)*

Схема современного электронного микроскопа



Сканирующая ЭМ

Качественный анализ

Просвечивающая ЭМ

МИКРОСКОПИЯ

Электронная микроскопия (ЭМ)

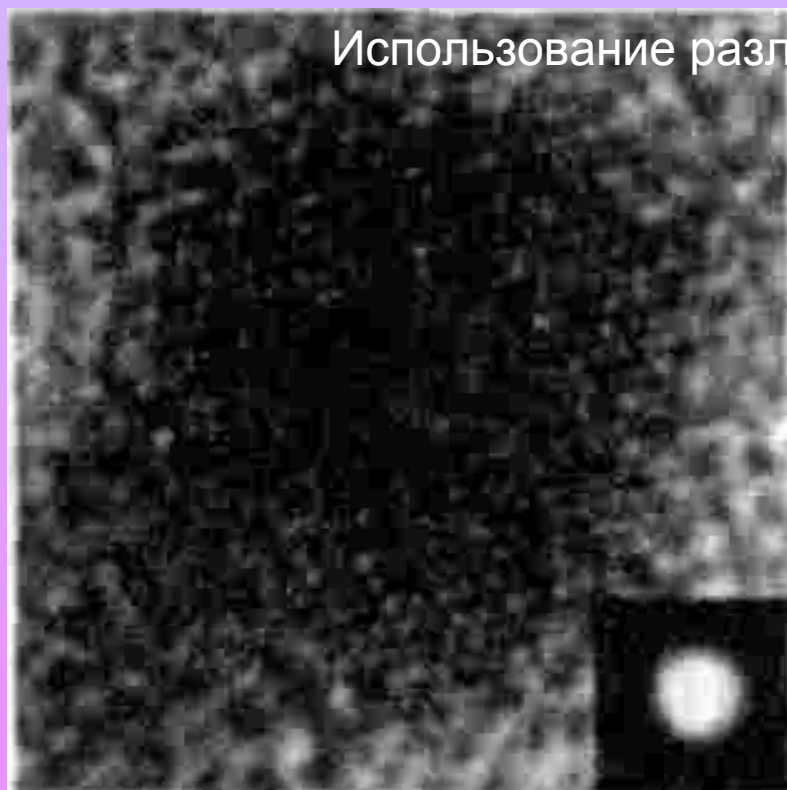
ЭМ- изображение частицы **Ni** на **SiO₂** [1]



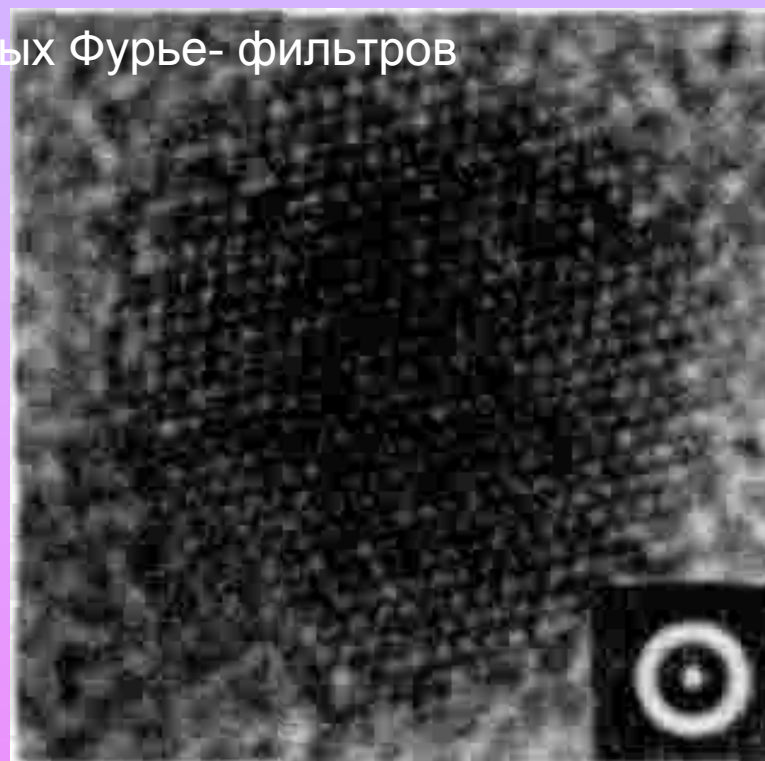
МИКРОСКОПИЯ

Электронная микроскопия (ЭМ)

ЭМ- изображение частицы **Ni** на **SiO₂** [1]



Использование различных Фурье- фильтров



МИКРОСКОПИЯ

Электронная микроскопия (ЭМ)

ЭМ- изображение частицы **Ni** на **SiO₂** [1]

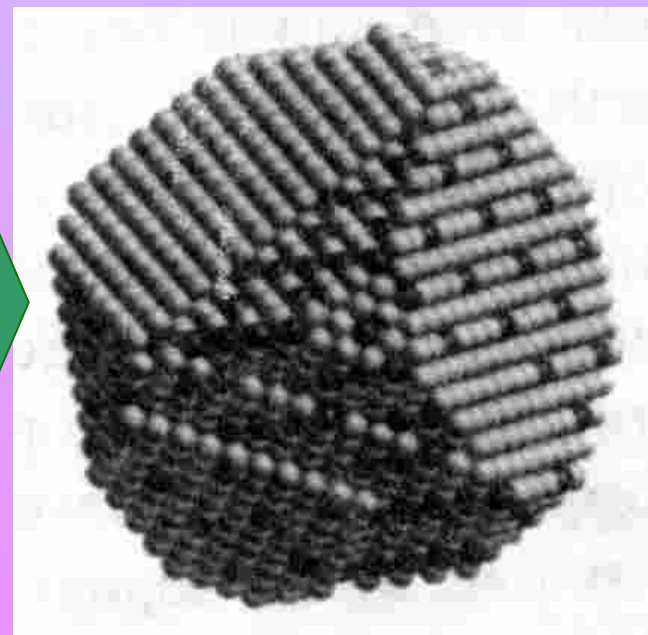
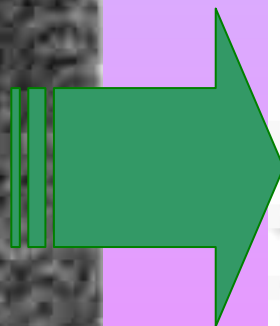


МИКРОСКОПИЯ

Электронная микроскопия (ЭМ)

ЭМ- изображение частицы Ni на SiO₂ [1]

Первоначальное изображение



**Модель наночастицы,
воссозданная на основе
полученных данных.**

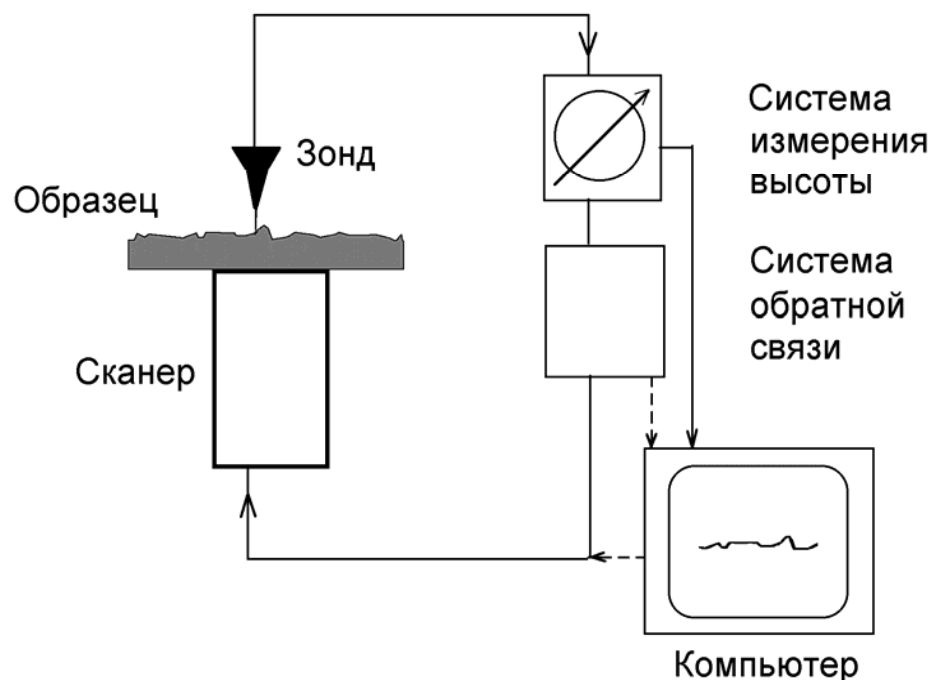
МИКРОСКОПИЯ

Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ)

Scanning probe microscopy (SPM)

Организация процесса сканирования в СЗМ

Блок-схема сканирующего туннельного микроскопа ¹



Основные элементы СЗМ ²:

1. Зонд.
2. Сканер.
3. Системы приближения зонда к образцу.
4. Система обратной связи.
5. Система управления сканированием и сбором данных.
6. Система виброизоляции.

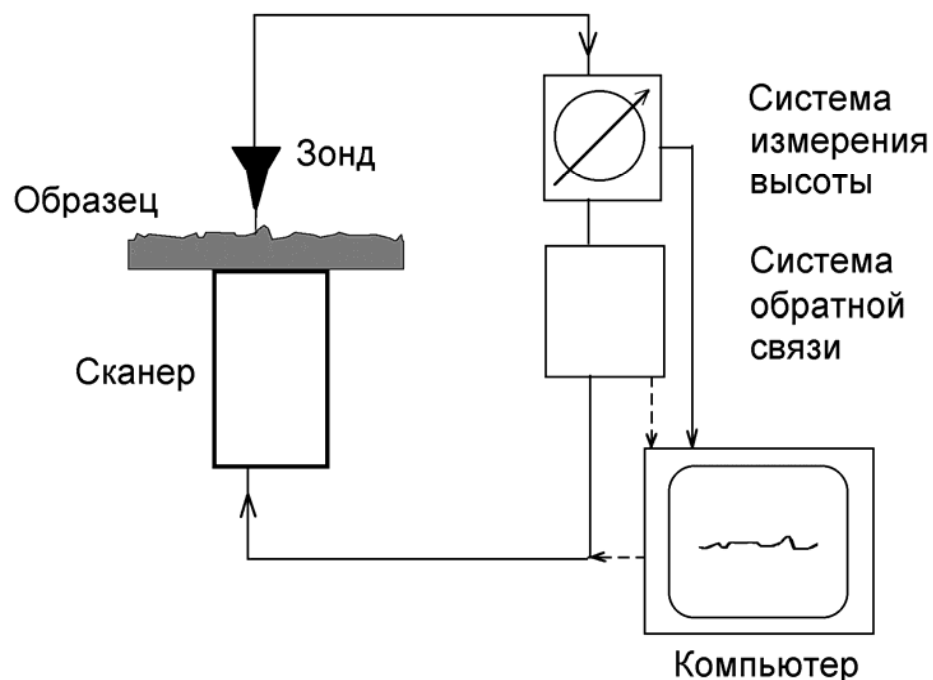
¹ Howland R.S. How to Buy a Scanning Probe Microscope. Stanford: Park Scientific Instruments, 1993. - 44 p.

² Шайхутдинов Ш.К., Кочубей Д.И. Исследования гетерогенных каталитических систем и их моделей методом сканирующей туннельной микроскопии // Успехи химии. - 1993. - Т. 62, № 5. - С. 443 – 453.

МИКРОСКОПИЯ

Сканирующая туннельная микроскопия (СТМ) Scanning tunneling microscopy (STM)

Блок-схема сканирующего туннельного микроскопа ¹



**Туннельный ток –
первое приближение:
 $I_t \sim U_t \times \exp(-b \times d)$**

Где:

U_t – напряжение,
 d – расстояние между иглой и
локальным местом
поверхности (величина
туннельного промежутка).

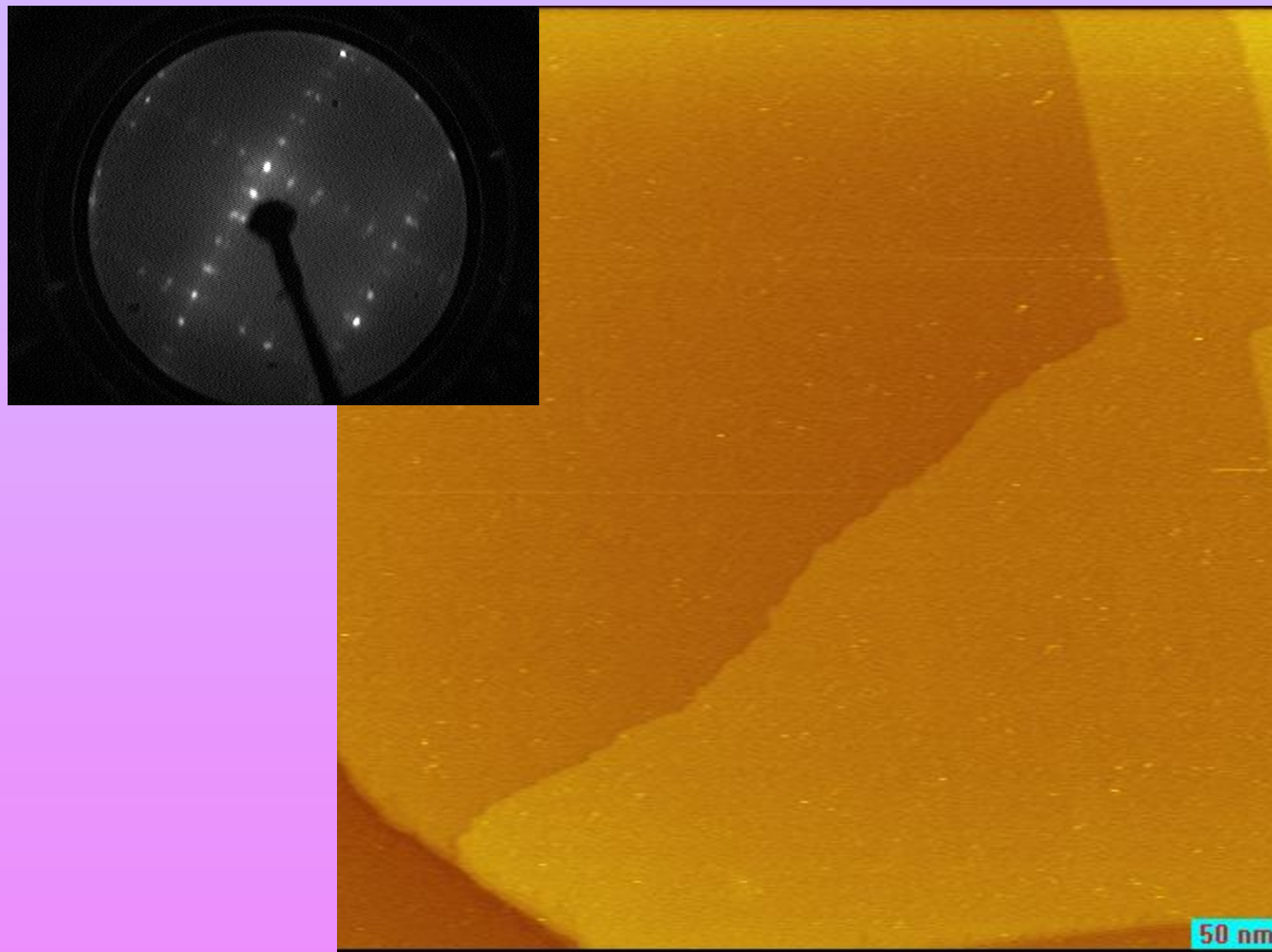
Информация, получаемая
методом СТМ:

морфология поверхности

¹ Howland R.S. How to Buy a Scanning Probe Microscope. Stanford: Park Scientific Instruments, 1993. - 44 p.

² Шайхутдинов Ш.К., Кочубей Д.И. Исследования гетерогенных каталитических систем и их моделей методом сканирующей туннельной микроскопии // Успехи химии. - 1993. - Т. 62, № 5. - С. 443 – 453.

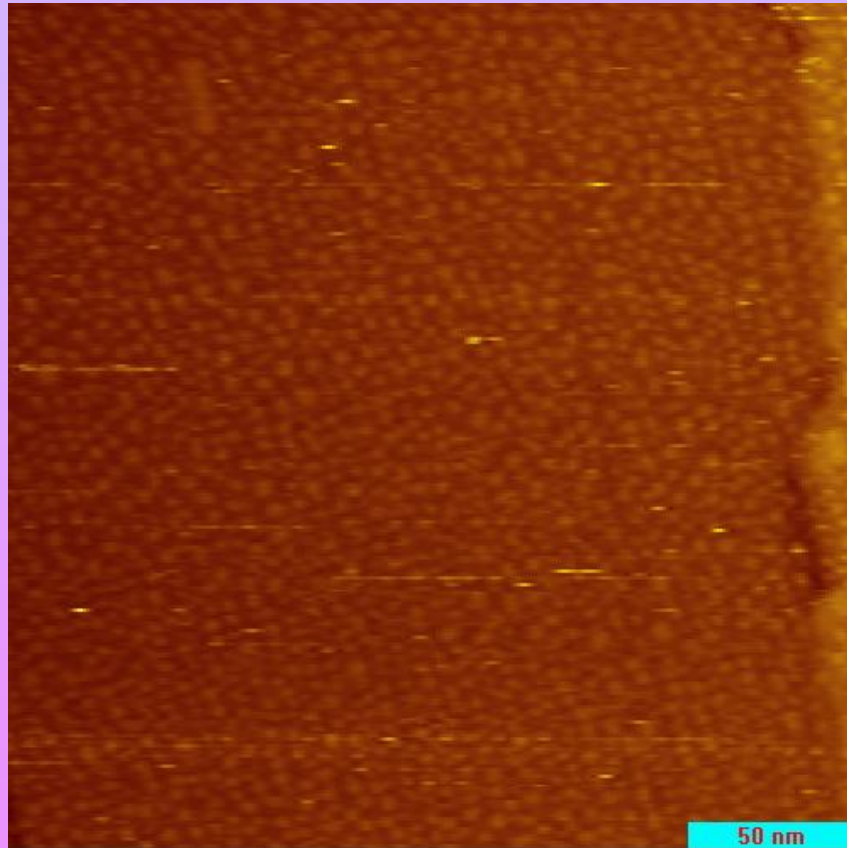
СТМ - исследование: формирование моноатомных островков NO/Pt(100)-(1x1) в ходе адсорбции NO на поверхности монокристалла Pt(100)-(5x20)*



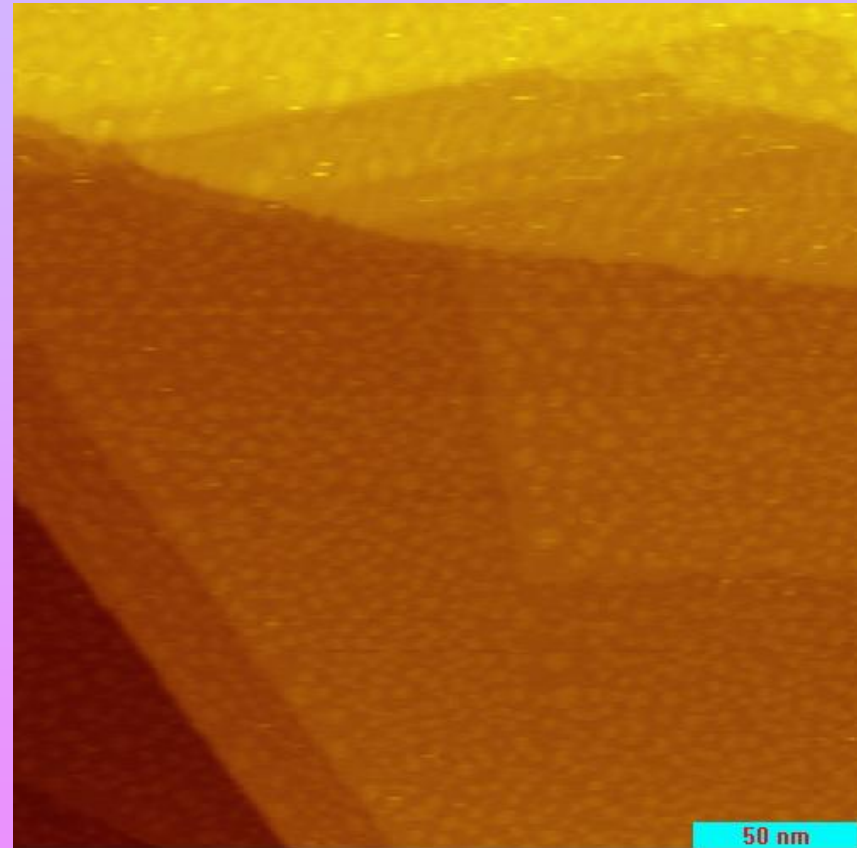
*Данные предоставлены Р.И. Квоном (Институт катализа СО РАН).

СТМ - исследование: формирование моноатомных островков NO/Pt(100)-(1x1) в ходе адсорбции NO на поверхности монокристалла Pt(100)-(5x20)*

$T_{\text{ads}} = 300\text{K}$

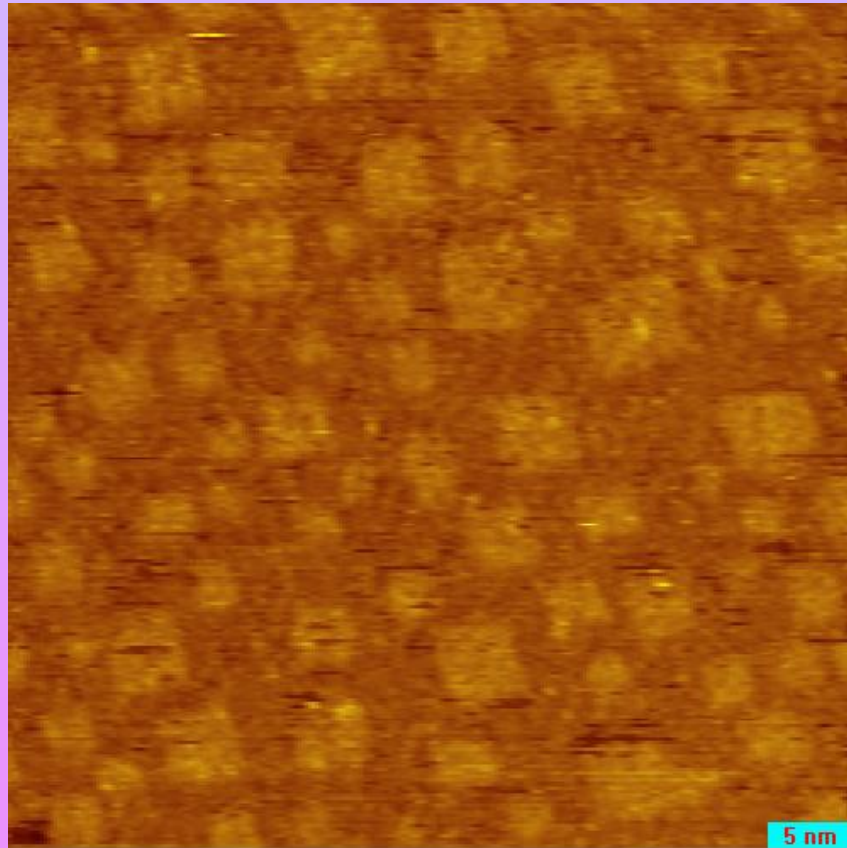


$T_{\text{ads}} = 570\text{K}$

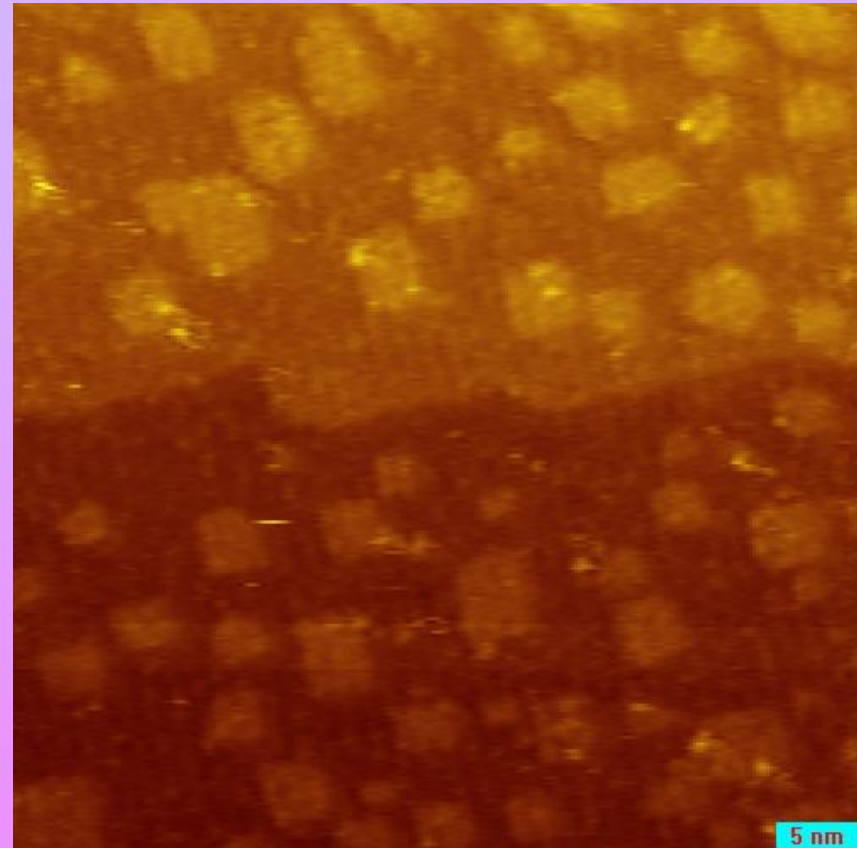


СТМ - исследование: формирование моноатомных островков NO/Pt(100)-(1x1) в ходе адсорбции NO на поверхности монокристалла Pt(100)-(5x20)*

$T_{\text{ads}} = 300\text{K}$

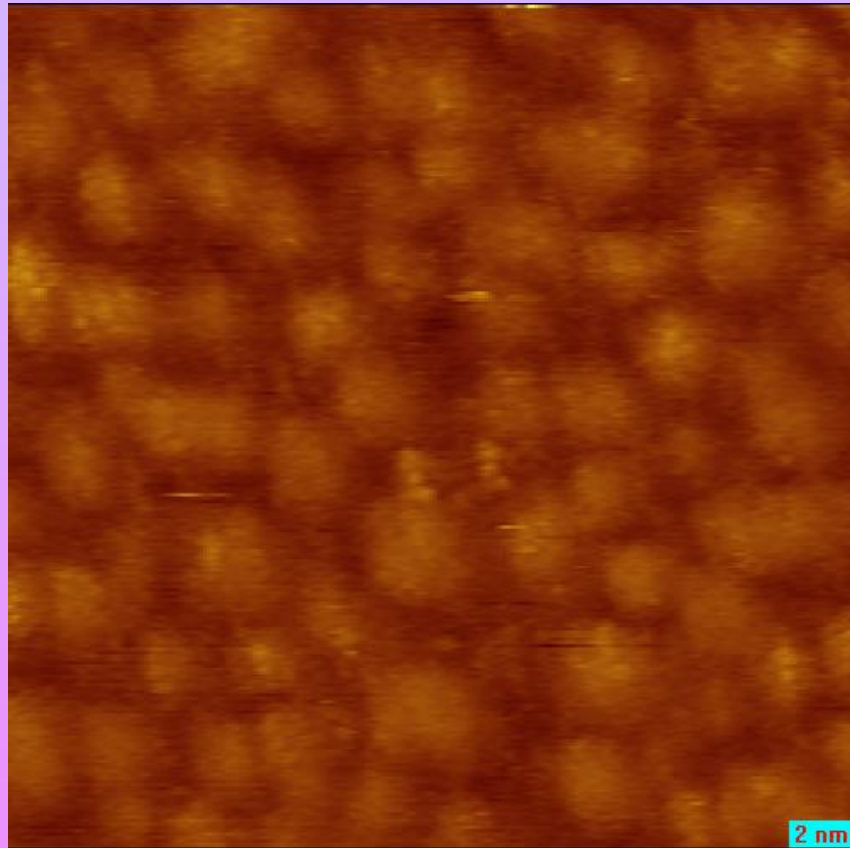


$T_{\text{ads}} = 570\text{K}$

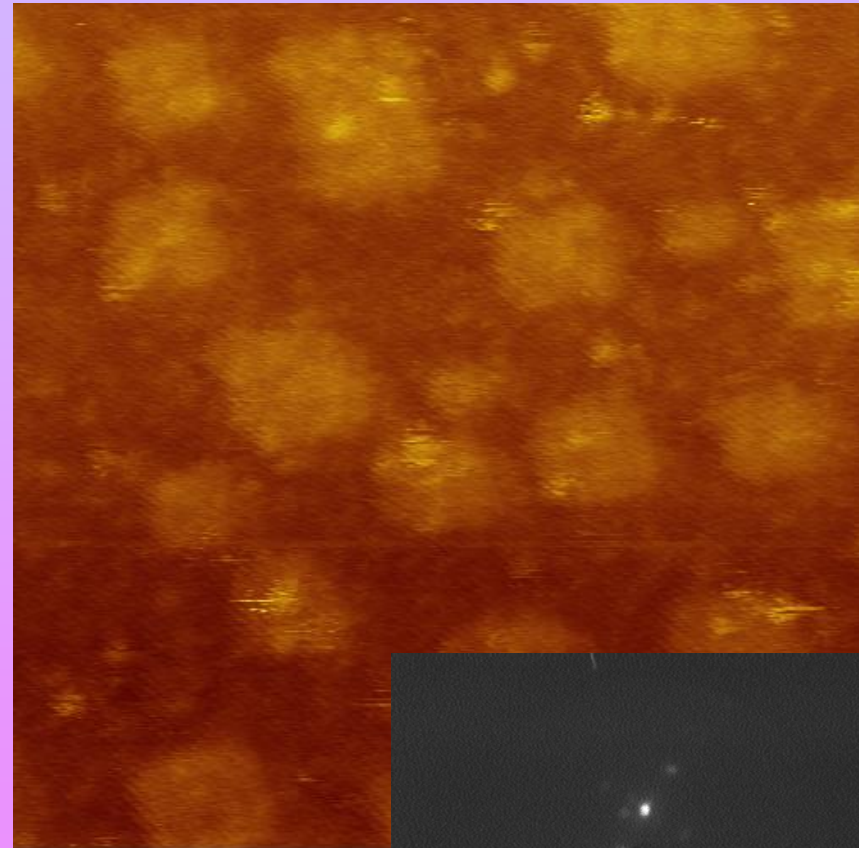


СТМ - исследование: формирование моноатомных островков NO/Pt(100)-(1x1) в ходе адсорбции NO на поверхности монокристалла Pt(100)-(5x20)*

$T_{\text{ads}} = 300\text{K}$



$T_{\text{ads}} = 570\text{K}$

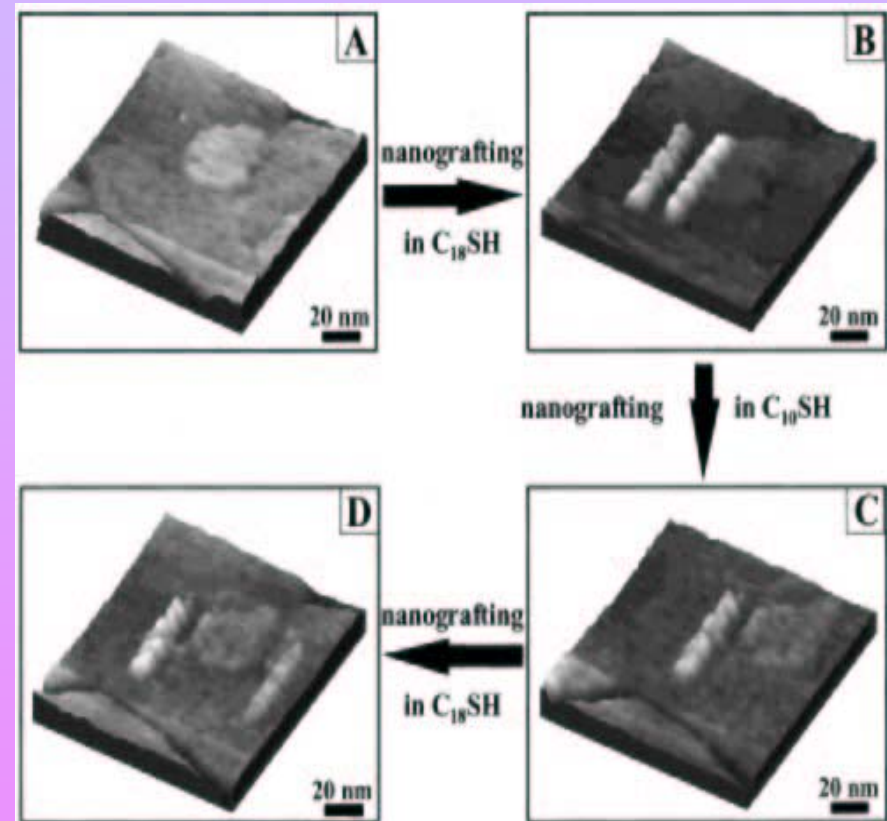
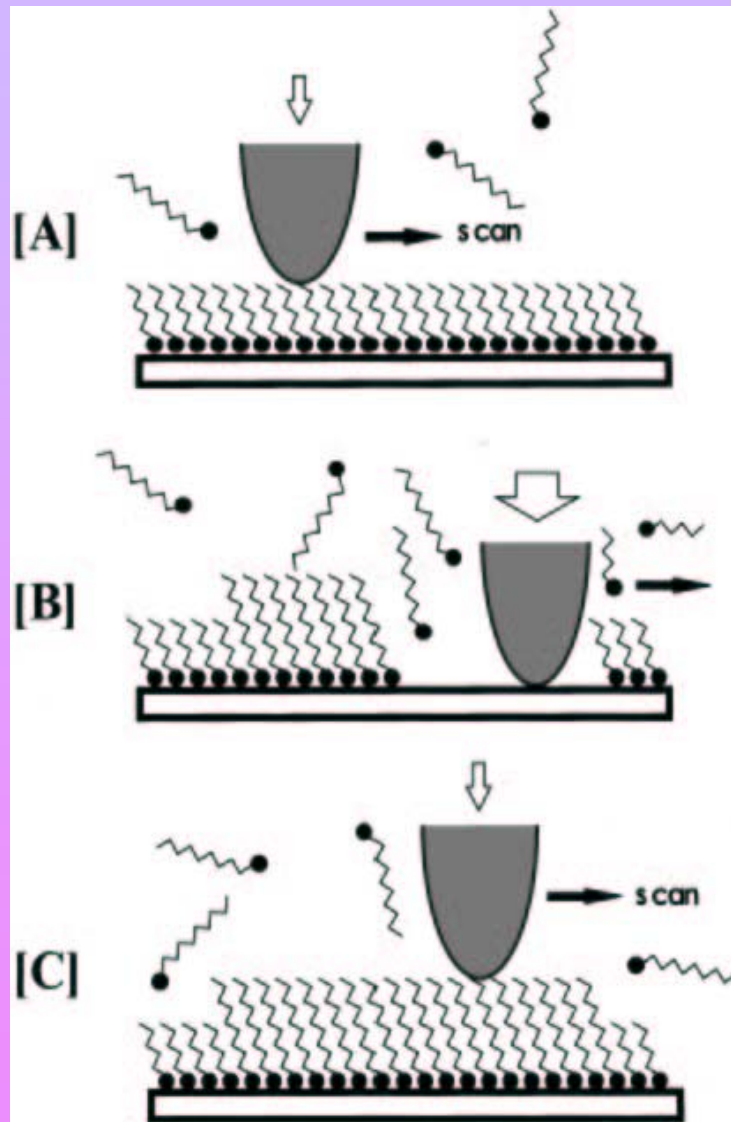


Температура адсорбции NO влияет скорее на плотность островков, а не на их размер.

Высота островков ~1.4 Å.

Механическая модификация поверхности с помощью СТМ

Прививка (nanografting)



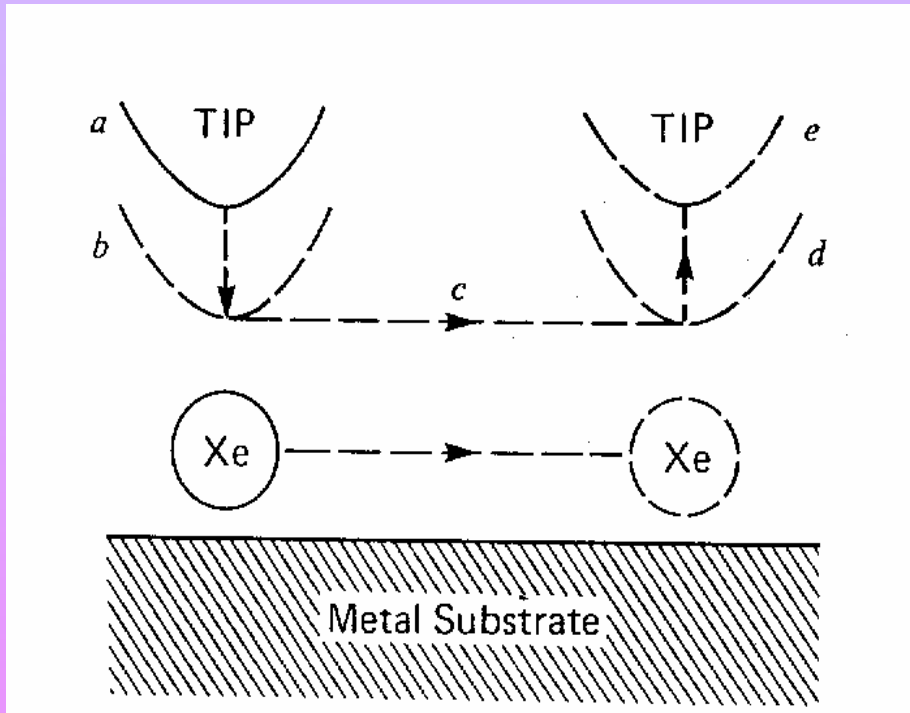
Подложка: Au/слюда.

$C_{18}SH$ – октадекантиол ($HS(CH_2)_{17}CH_3$),

$C_{10}SH$ – декантиол ($HS(CH_2)_9CH_3$).

Механическая модификация поверхности с помощью СТМ

Перетаскивание одиночных атомов

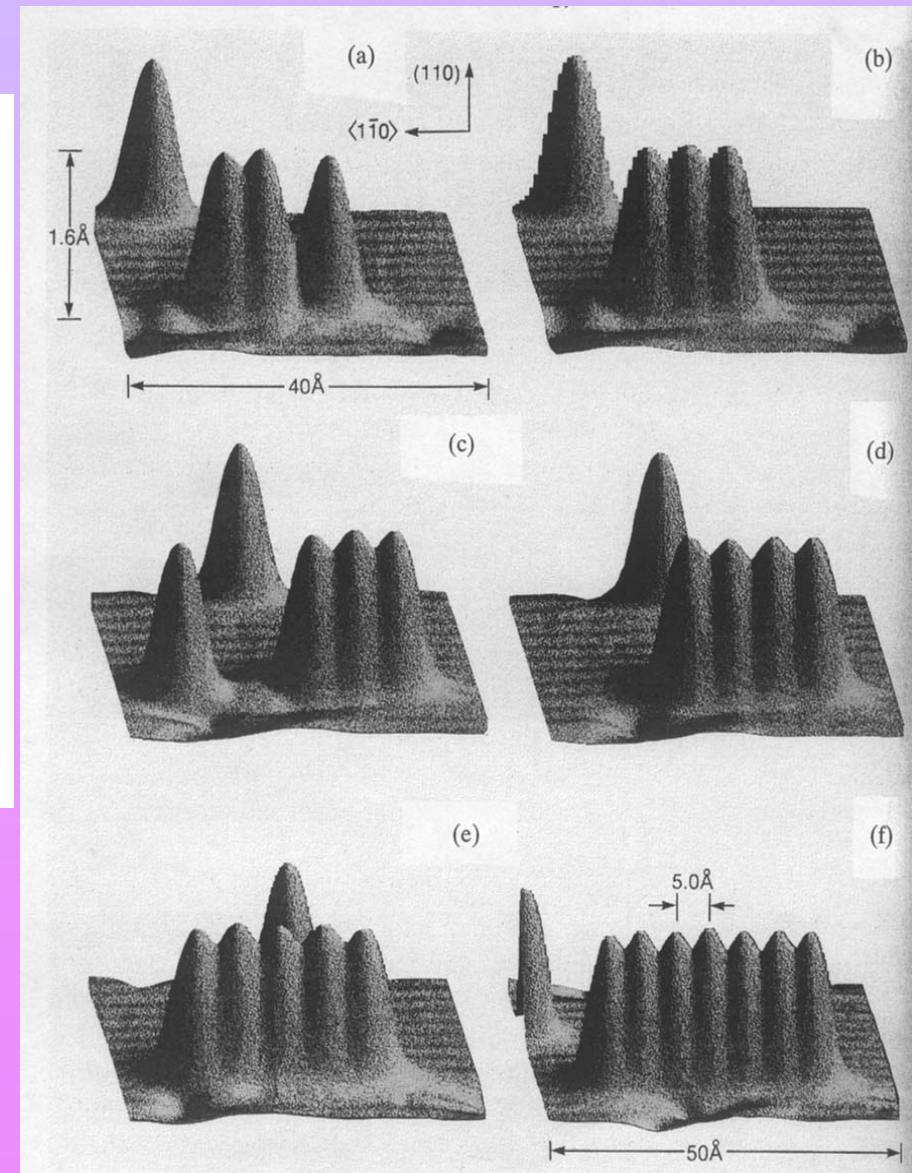


**Атомы Хе по поверхности
Ni(110) при 4К**

Напряжение – 10 мВ

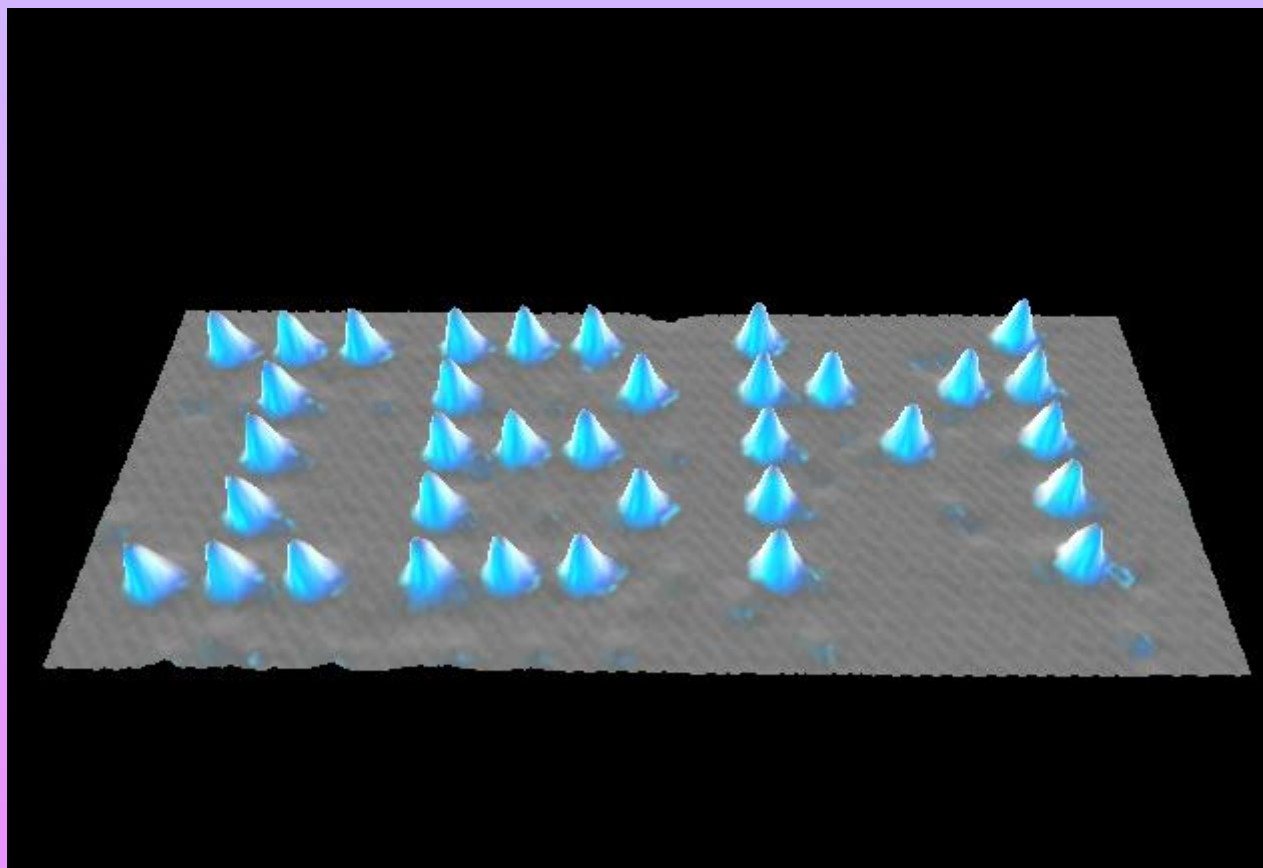
Ток – а) 1 нА

б) 16 нА



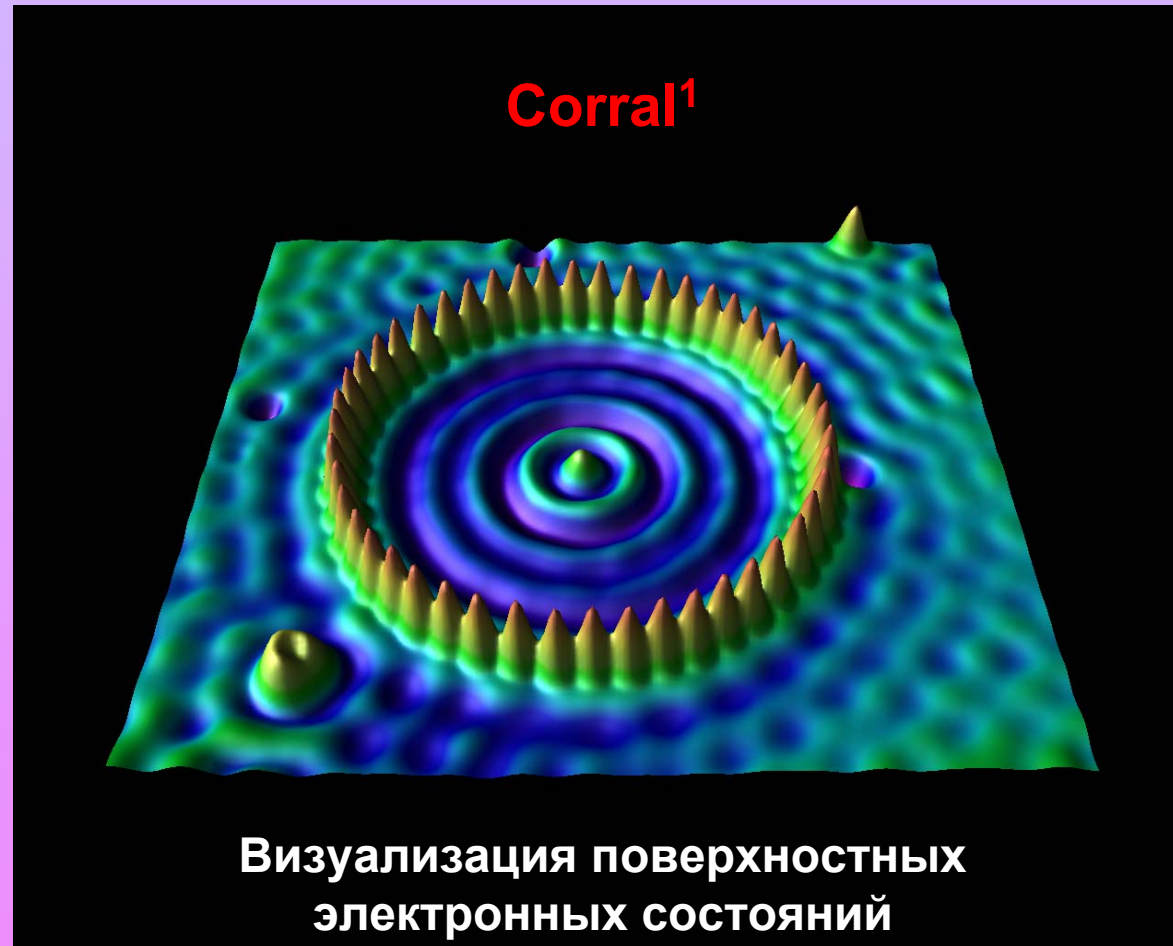
Возможности СЗМ. Нанолитография СТМ

Ксенон на никеле



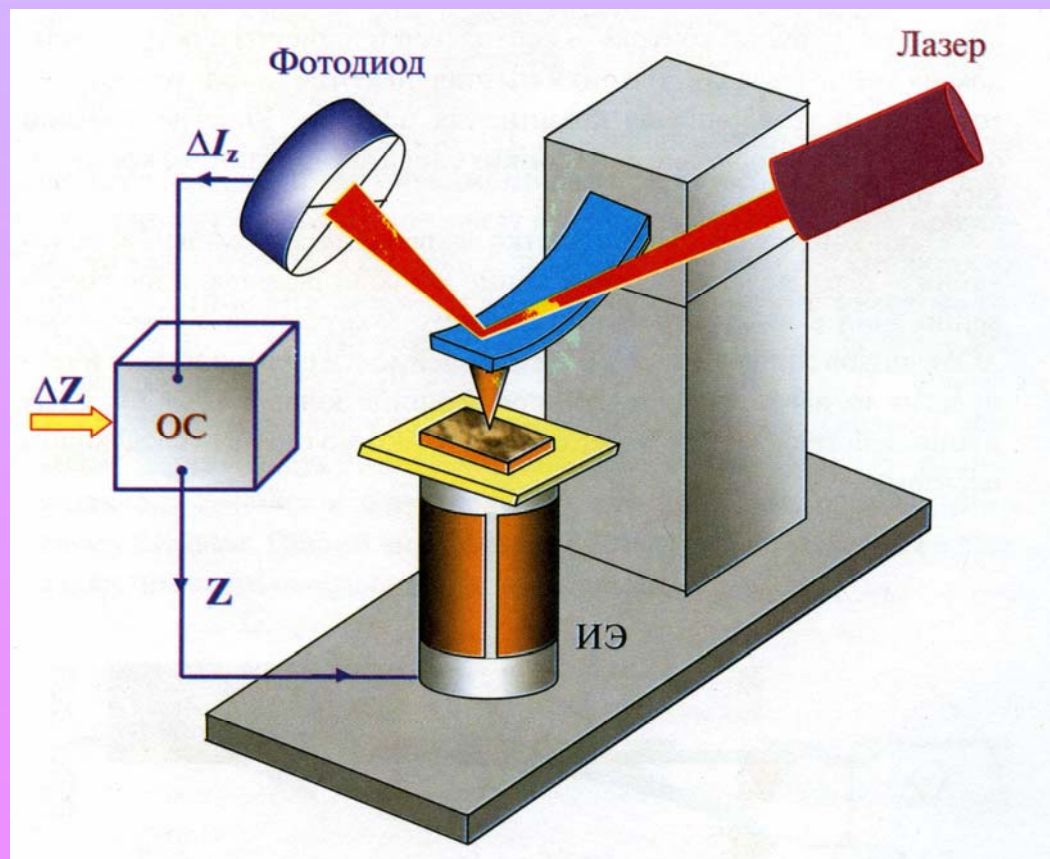
Возможности СЗМ. Нанолитография СТМ

Круговая структура (коралл) с радиусом 71.3 А собрана на Си(111) из 48 индивидуальных атомов Fe с использованием иглы низкотемпературного СТМ.



¹ M.F. Crommie, C.P. Lutz, D.M. Eigler. Confinement of electrons to quantum corrals on a metal surface. Science 262, 218-220 (1993).

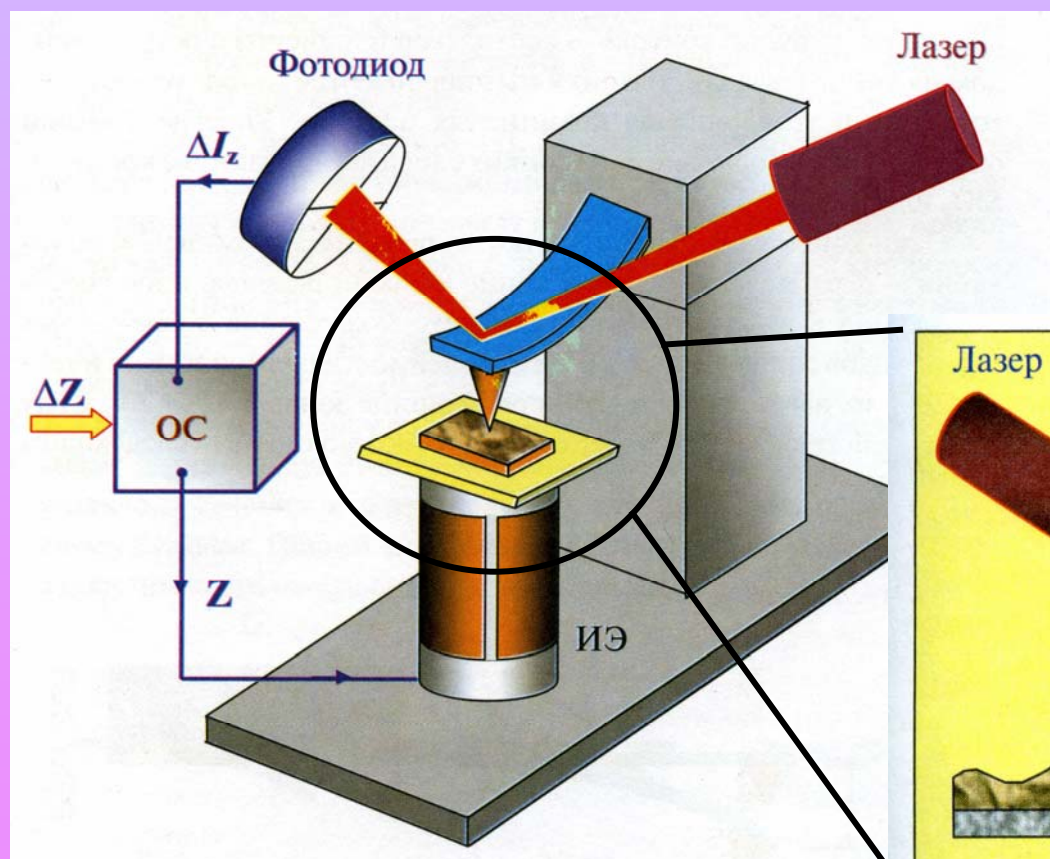
МИКРОСКОПИЯ

**Атомно-силовая микроскопия (АСМ)
Atomic force microscopy (ASM)**

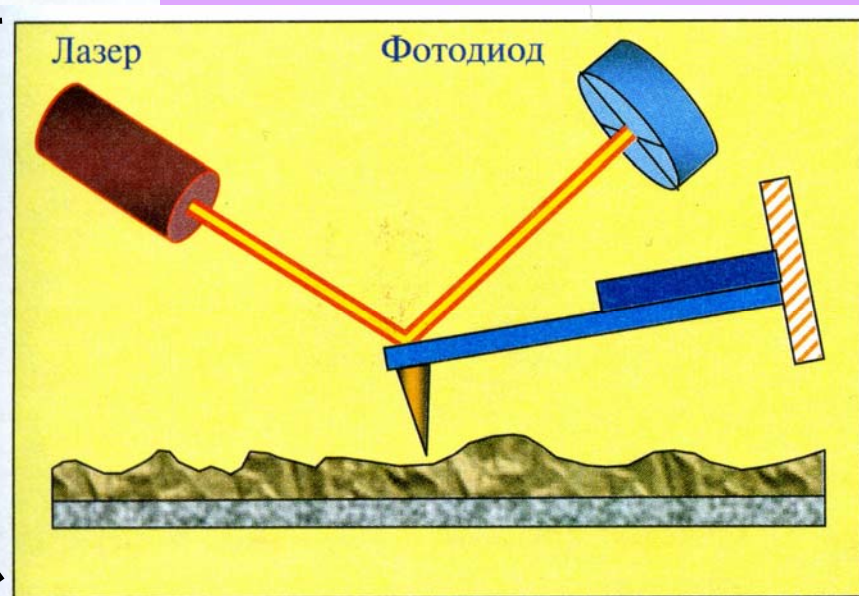
Общая блок-схема атомно-силового микроскопа (оптическая регистрация изгиба консоли) [1]

МИКРОСКОПИЯ

Атомно-силовая микроскопия (АСМ)

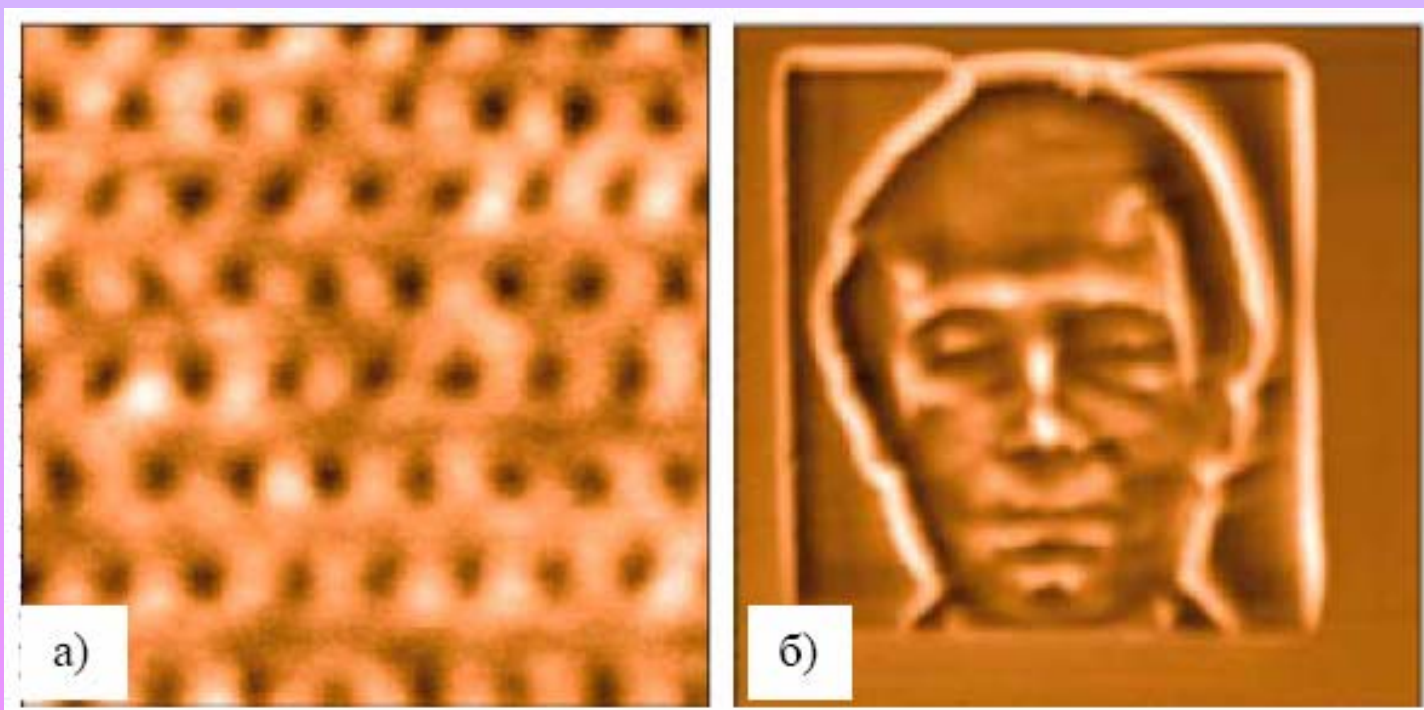


Общая блок-схема атомно-силового микроскопа (оптическая регистрация изгиба консоли) [1]



Возможности СЗМ. Нанолитография АСМ¹

Векторная динамическая силовая АСМ – литография (наночеканка).



(размер скана 220нм×220нм)

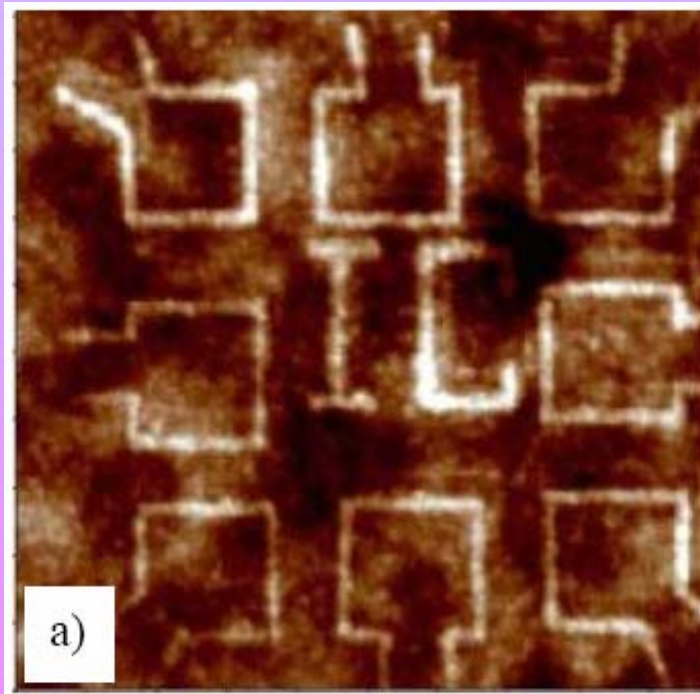
(размер скана 2.5мкм×2.6мкм)

Рис. 5-6. Пример векторной динамической силовой литографии (а) (размер скана 220х220 нм²) в виде регулярного массива углублений (питов) и растровой литографии (размер скана 2,5х2,6 мкм)

¹Сканирующая зондовая микроскопия, спектроскопия и литография. Учебное пособие. А.В. Круглов, Д.О. Филатов. Москва-Нижний Новгород-Санкт-Петербург. 2004. С. 159.

Возможности СЗМ. Нанолитография АСМ¹

АСМ - литография, осуществляемая путем локального окисления поверхности с помощью проводящего зонда.



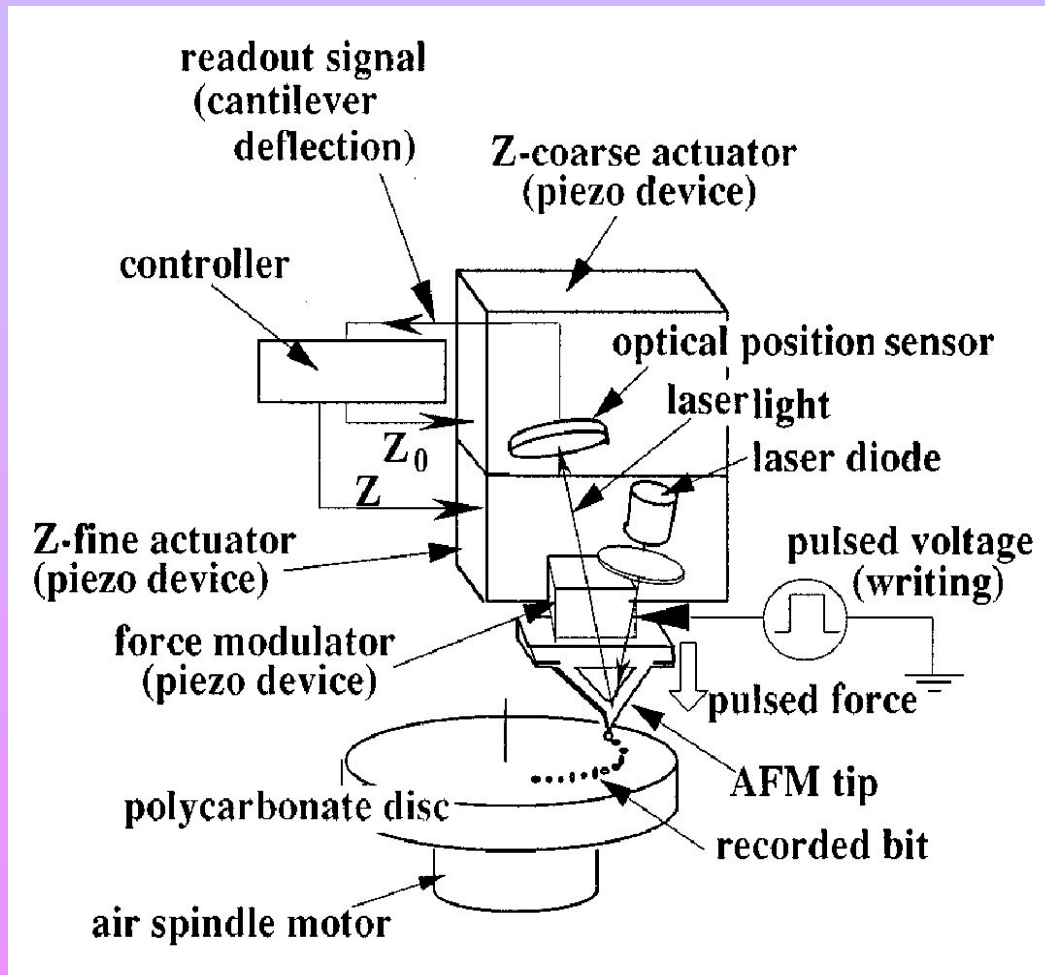
(размер скана 500нм×500нм)



(размер скана 2.3мкм×3.0мкм)

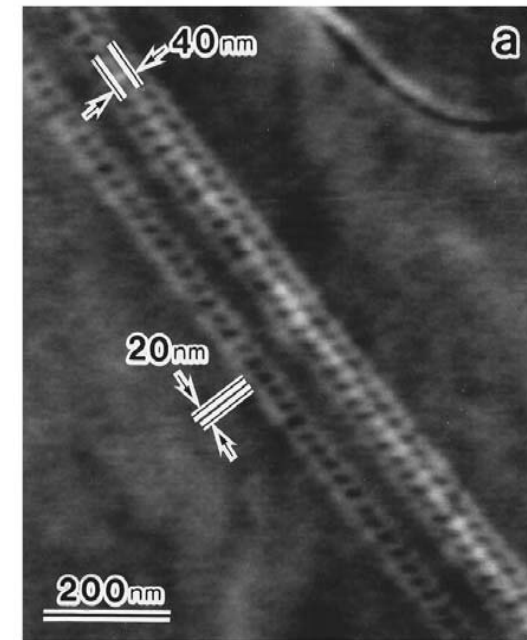
¹Сканирующая зондовая микроскопия, спектроскопия и литография. Учебное пособие. А.В. Круглов, Д.О. Филатов. Москва-Нижний Новгород-Санкт-Петербург. 2004. С. 159.

АСМ записывающее устройство



**Плотность записи – 1200 ГБит/дюйм²
(силовые импульсы 60 нН за 1 тсек)**

Скорость считывания – 1.25 МБит/с



Массив наноямок, записанный с использованием силовых импульсов

