Проф. Федотов А.К.

Кафедра энергофизики

Электроника поверхности

(Роль поверхности в электронике)

dl.bsu.by* => *Физический факультет => Проект Erasmus +=> Functional Nanomaterials (Функциональные наноматериалы) =>
Глава 2 «Введение в физико-химию поверхности»

Электроника поверхности

«Бог создал объем, а поверхность - порождение Дьявола»

В. Паули

«Поверхности очень интересны, но ведь их так мало...»

Э. Ферми

Электроника поверхности

1. **Причины возрастания роли поверхности при уменьшении размера объекта (например, чипа)**

Электроника поверхности

1. **Причины возрастания роли поверхности при уменьшении размера объекта (например, чипа)**

2. **Изменение атомной структуры поверхности**

Электроника поверхности

1. **Причины возрастания роли поверхности при уменьшении размера объекта (например, чипа)**

2. **Изменение атомной структуры поверхности**

3. **Колебания атомов вблизи поверхности**

Электроника поверхности

1. Причины возрастания роли поверхности при уменьшении размера объекта (например, чипа)

2. Изменение атомной структуры поверхности

3. Колебания атомов вблизи поверхности

4. Изменение электронной структуры кристалла на поверхности (появление ПЭС)

Электроника поверхности

1. Причины возрастания роли поверхности при уменьшении размера объекта (например, чипа)

2. Изменение атомной структуры поверхности

3. Колебания атомов вблизи поверхности

4. Изменение электронной структуры кристалла на поверхности (появление ПЭС)

5. Изменение свойств кристалла из-за влияния поверхности (классические и квантовые размерные эффекты)

Электроника поверхности

1. **Причины возрастания роли поверхности при уменьшении размера объекта (например, чипа)**

Электроника поверхности

1. Причины возрастания роли поверхности при уменьшении размера объекта

- Доля атомов N, находящихся в тонком приповерхностном слое (~1 нм), растет с уменьшением размера частички вещества R, поскольку $N \sim S/V \sim R^2/R^3 \sim 1/R$ (здесь S - поверхность частички, V - ее объем).

Электроника поверхности

1. Причины возрастания роли поверхности при уменьшении размера объекта

- Доля атомов N, находящихся в тонком приповерхностном слое (~1 нм), растет с уменьшением размера частички вещества R, поскольку $N \sim S/V \sim R^2/R^3 \sim 1/R$ (здесь S - поверхность частички, V - ее объем).

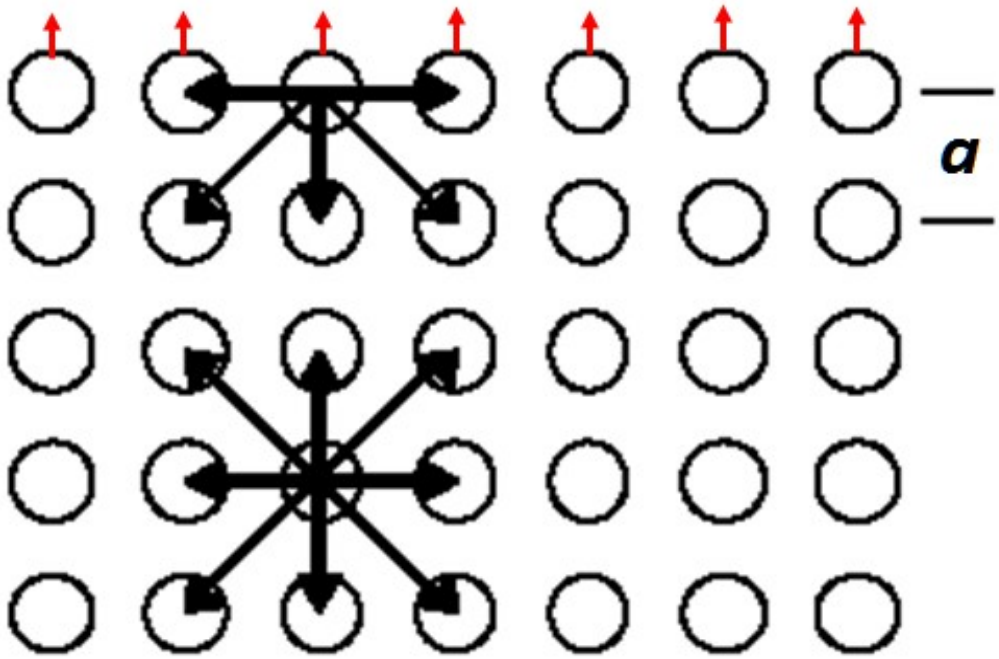
- Атомная реконструкция или релаксация, в результате которой на атомарно-чистой поверхности возникнет другой порядок расположения атомов.

Электроника поверхности

2. Изменение атомной структуры поверхности

Электроника поверхности

2. Изменение атомной структуры поверхности



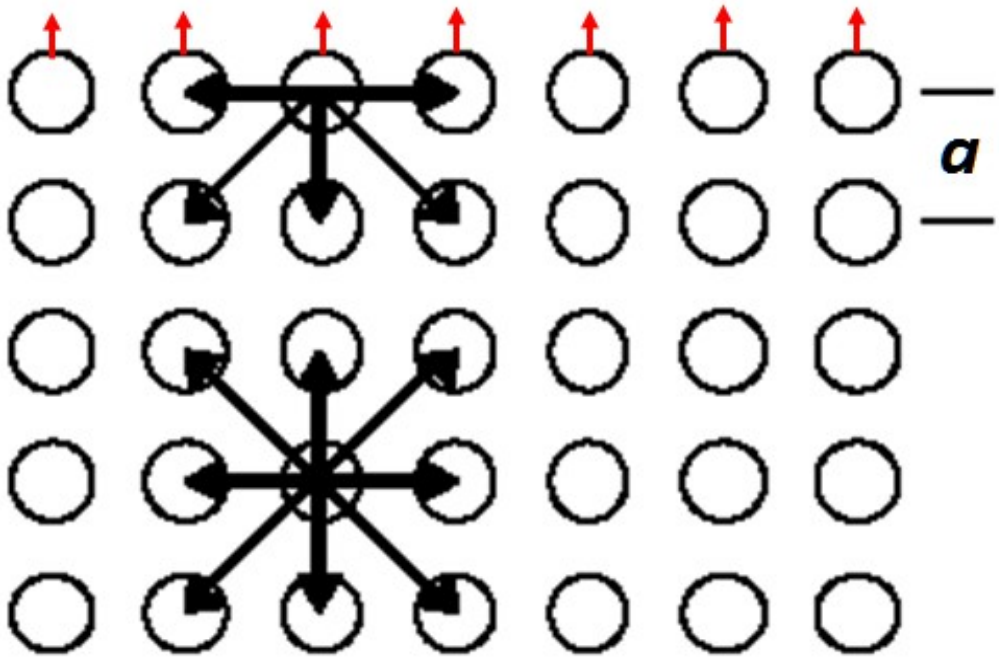
Особые условия атомов на поверхности по сравнению с атомами в объеме кристалла:

- ***обрыв трансляционной симметрии кристалла***

Анизотропия сил, действующих на атомы на поверхности и в объеме кристалла

Электроника поверхности

2. Изменение атомной структуры поверхности



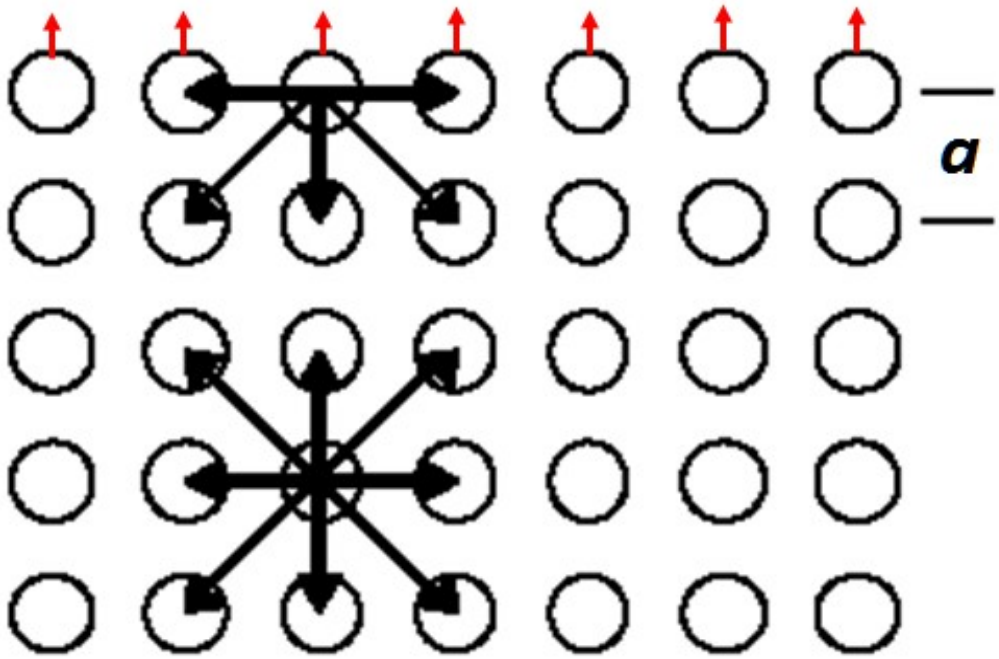
Особые условия атомов на поверхности по сравнению с атомами в объеме кристалла:

- ***обрыв трансляционной симметрии кристалла***
- ***Формирование оборванных связей***

Анизотропия сил, действующих на атомы на поверхности и в объеме кристалла

Электроника поверхности

2. Изменение атомной структуры поверхности



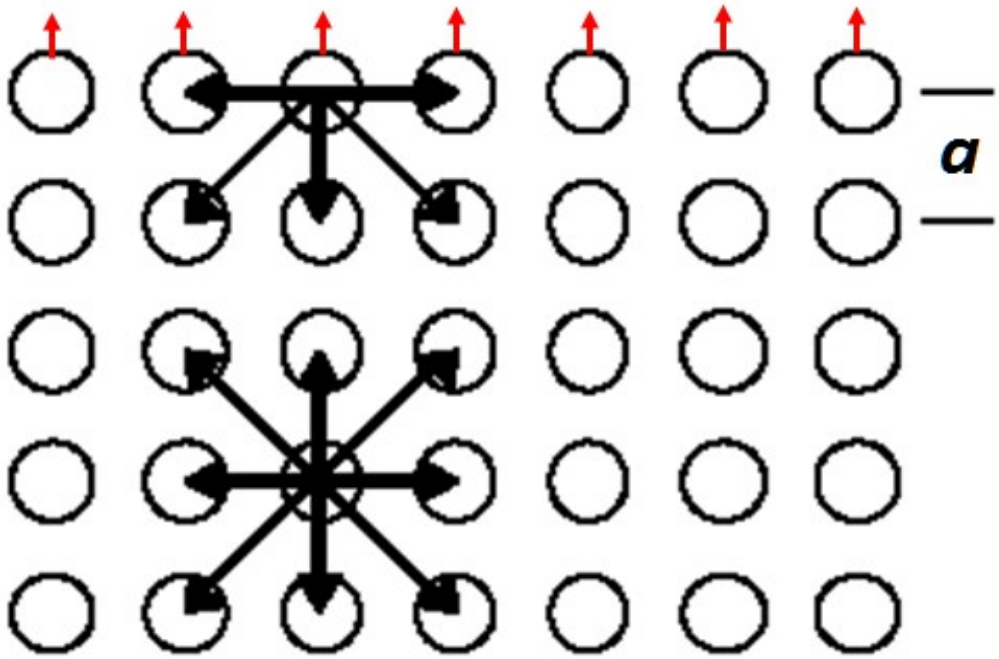
Результат:

•атомная структура поверхно-стной области кристалла становится совершенно иной, чем в объеме;

Анизотропия сил, действующих на атомы на поверхности и в объеме кристалла

Электроника поверхности

2. Изменение атомной структуры поверхности



Результат:

- *атомная структура поверхно-стной области кристалла становится совершенно иной, чем в объеме;*
- *поведение квазичастиц (электронов, фононов) вблизи поверхности кристалла становится совсем не таким, как в его объеме;*

Анизотропия сил, действующих на атомы на поверхности и в объеме кристалла

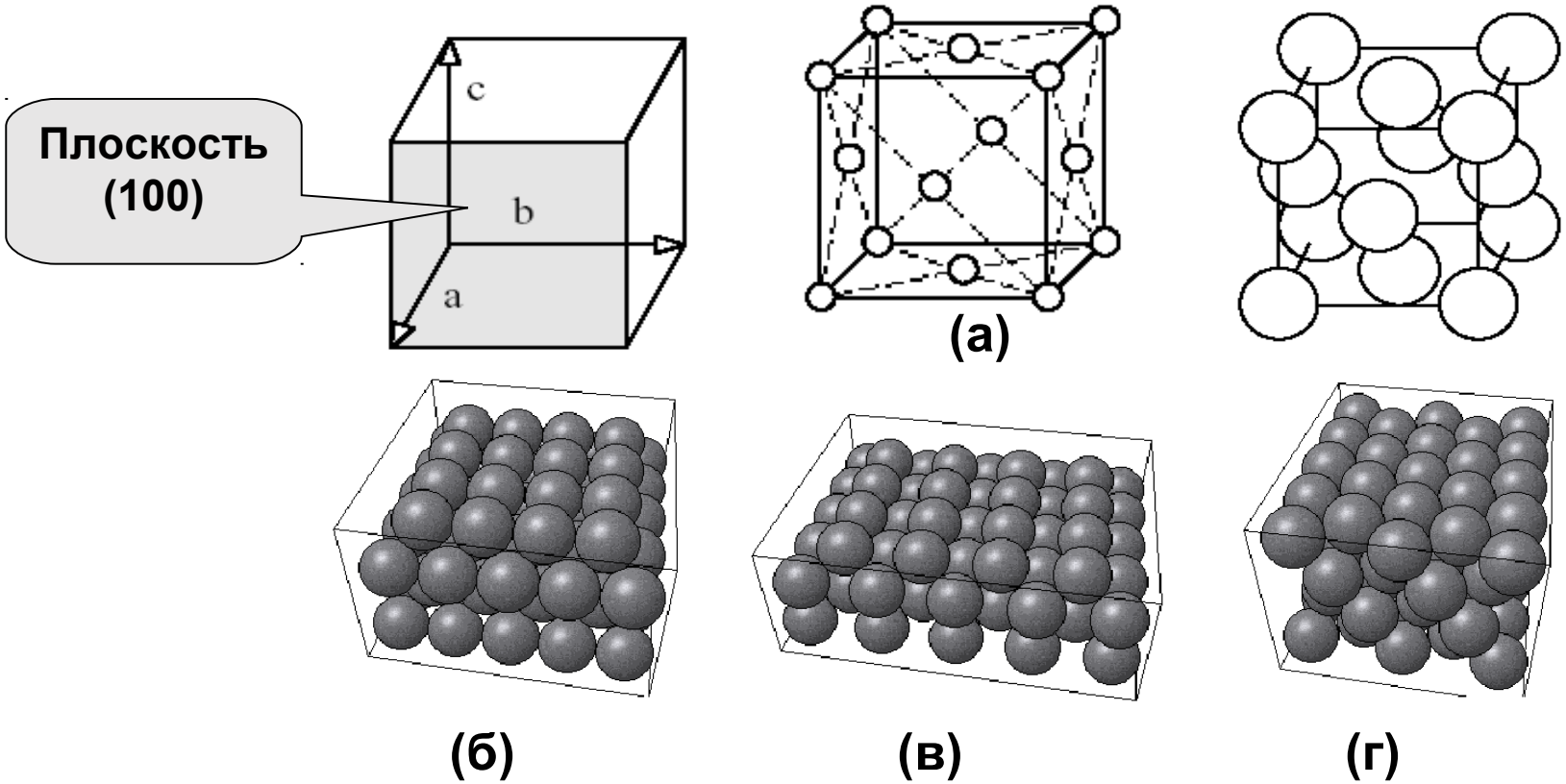
Электроника поверхности

2. Изменение атомной структуры поверхности

Идеальную кристаллическую поверхность в простейшем случае можно получить разрывом кристалла вдоль какой-либо кристаллографической плоскости

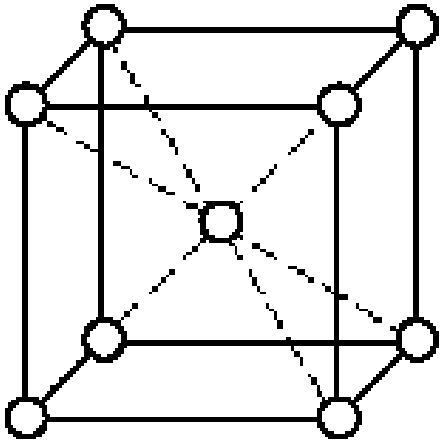
Электроника поверхности

Вид элементарной ячейки для ГЦК решетки (а) и идеальных поверхностей кристалла разорванного вдоль плоскостей
б - (100), *в* - (110), *г* – (111)

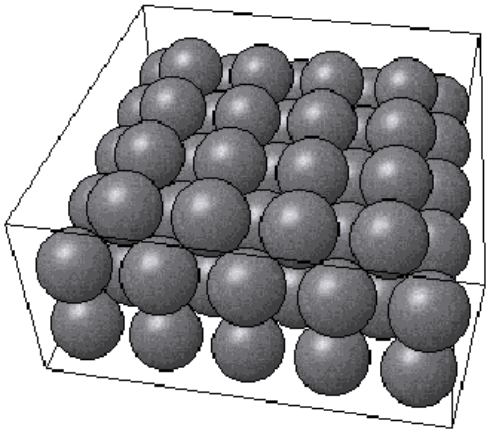


Электроника поверхности

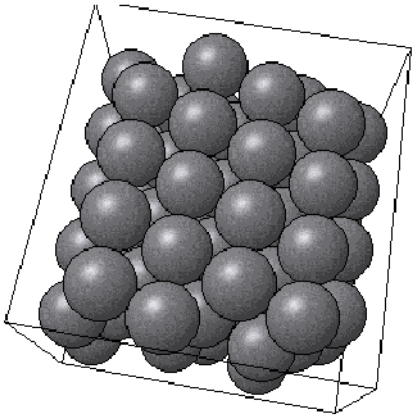
Вид элементарной ячейки для ОЦК решетки (а) и идеальных поверхностей кристалла разорванного вдоль плоскостей: *б* - (100), *в* - (110), *г* – (111)



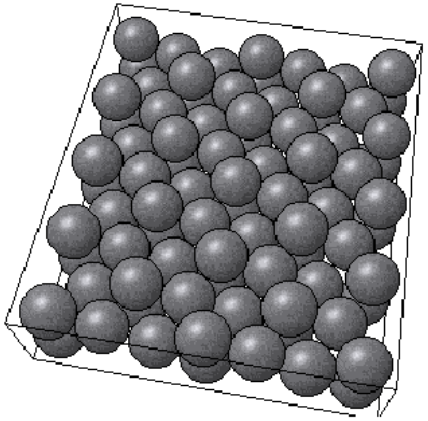
(а)



(б)



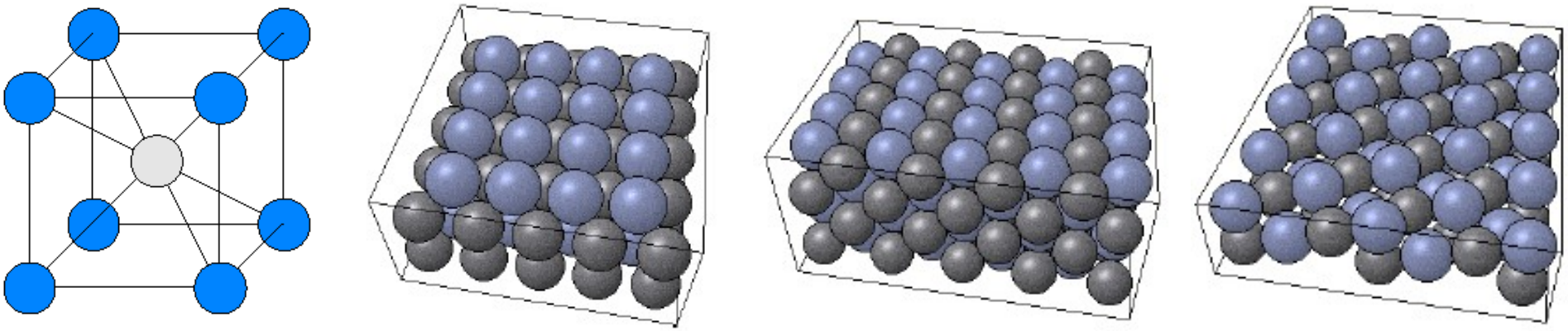
(в)



(г)

Электроника поверхности

Вид элементарной ячейки для решетки типа CsCl (а) и идеальных поверхностей кристалла разорванного вдоль плоскостей: *б* - (100), *в* - (110), *г* – (111)



(а) **(б)** **(в)** **(г)**

Электроника поверхности

2. Изменение атомной структуры поверхности

Наличие оборванных связей на поверхности энергетически очень невыгодно.

Поэтому, поверхностные электроны приобретают тенденцию к образованию новых связей.

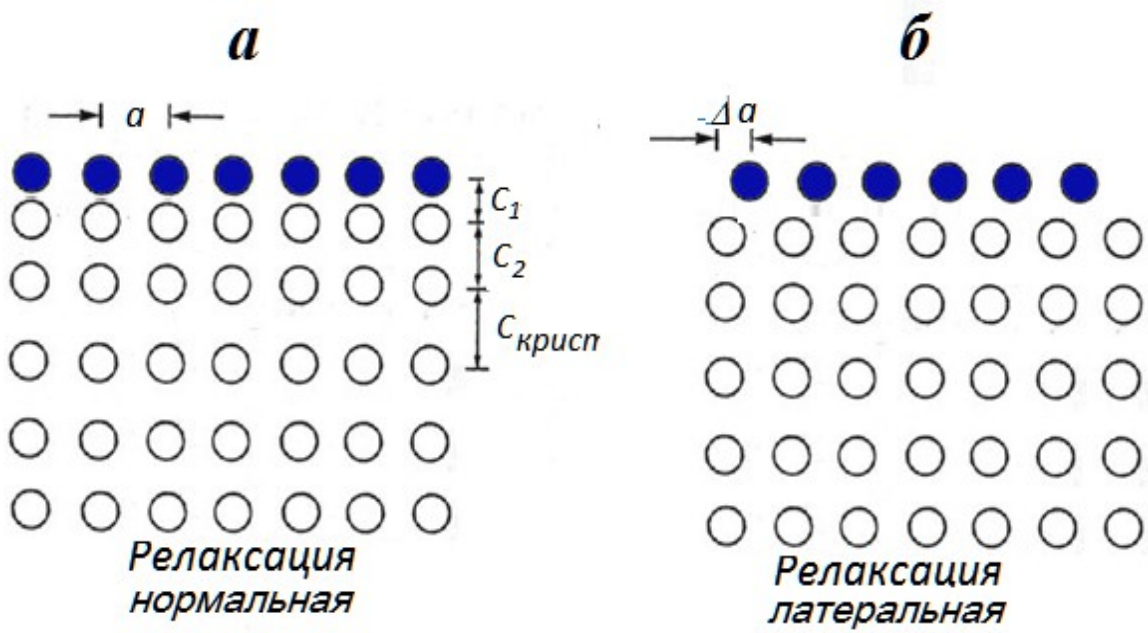
Электроника поверхности

2. Изменение атомной структуры поверхности

Если поверхность атомно-гладкая и на ней нет никаких посторонних атомов, то у поверхностных электронов остается лишь одна возможность для насыщения (спаривания) связей: ***образовать добавочные связи между самими поверхностными атомами***.

Электроника поверхности

2. Изменение атомной структуры поверхности



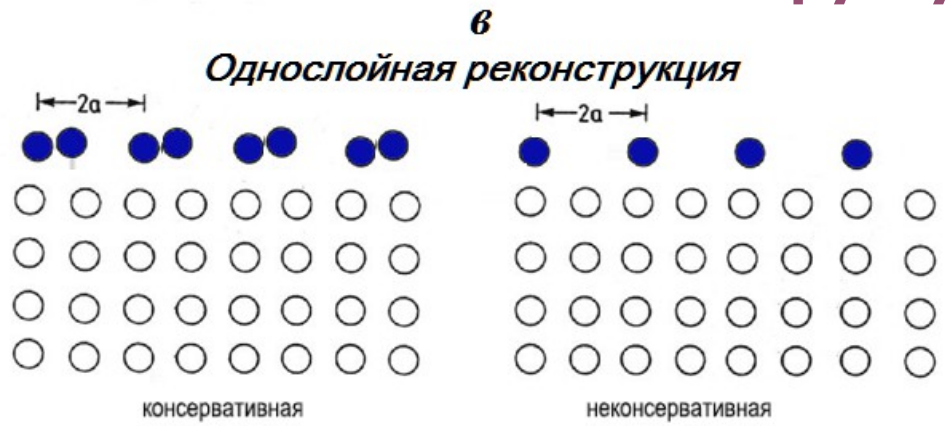
Как следует из рисунка, в случае перестройки атомов **на атомно-чистой поверхности кристаллу** удобно приписать ***составной вид***:

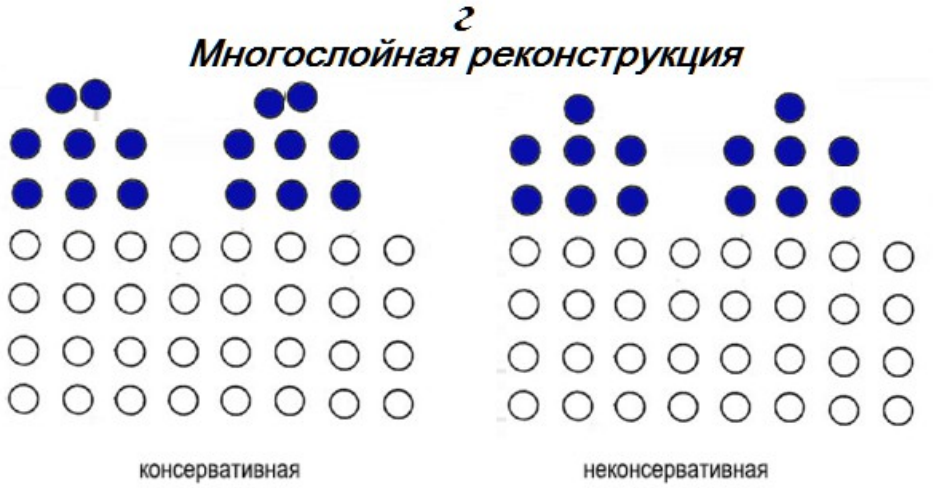
Подложка **+** ***кромка***

Перестройка структуры поверхностных атомов в случае нормальной (*а*) и латеральной (*б*) релаксации (поперечное сечение)

Электроника поверхности

2. Изменение атомной структуры поверхности





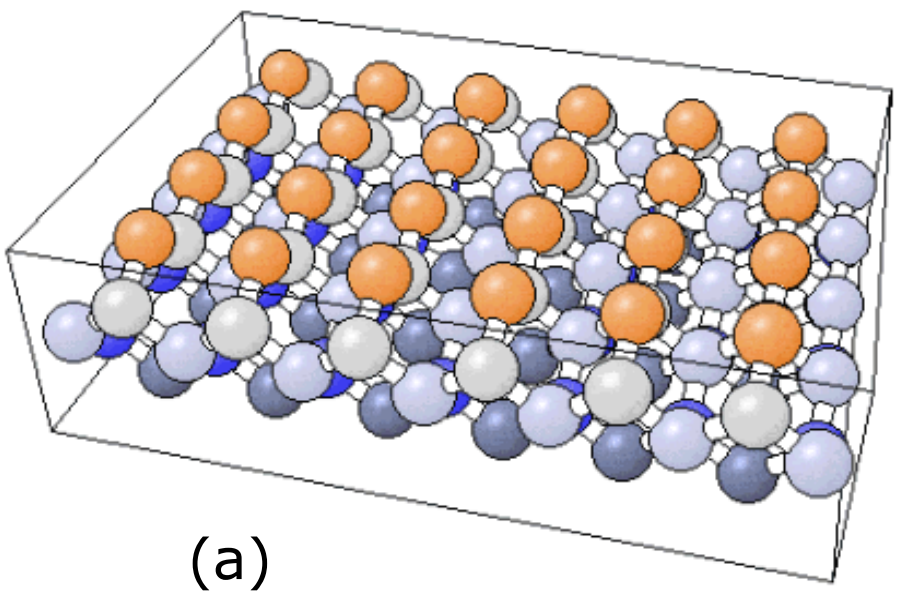
Перестройка структуры поверхностных атомов в случае однослойной (*в*) и многослойной (г) реконструкции (попереч-ное сечение)

Электроника поверхности

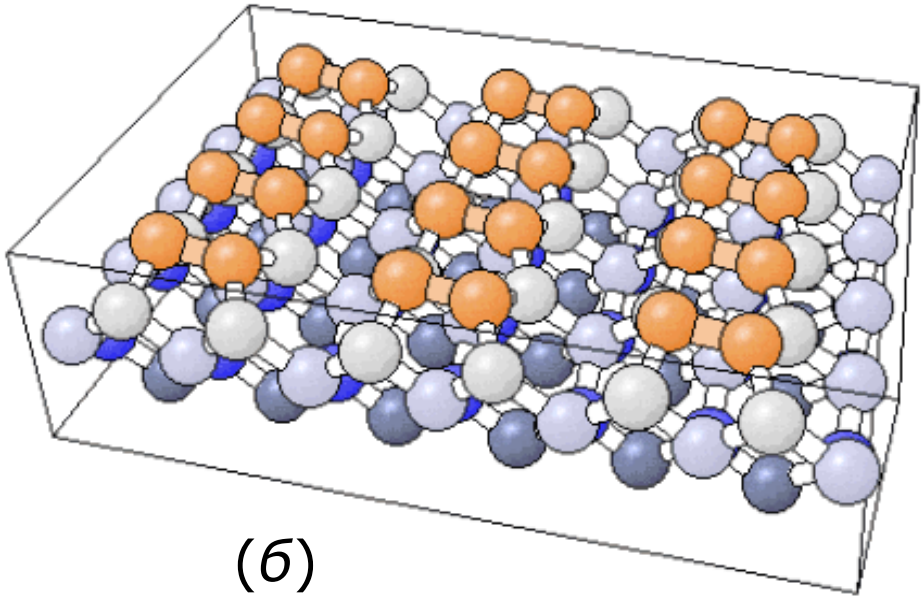
Примеры последовательности реконструкции поверхности кремния

Электроника поверхности

2. Изменение атомной структуры поверхности



(а)

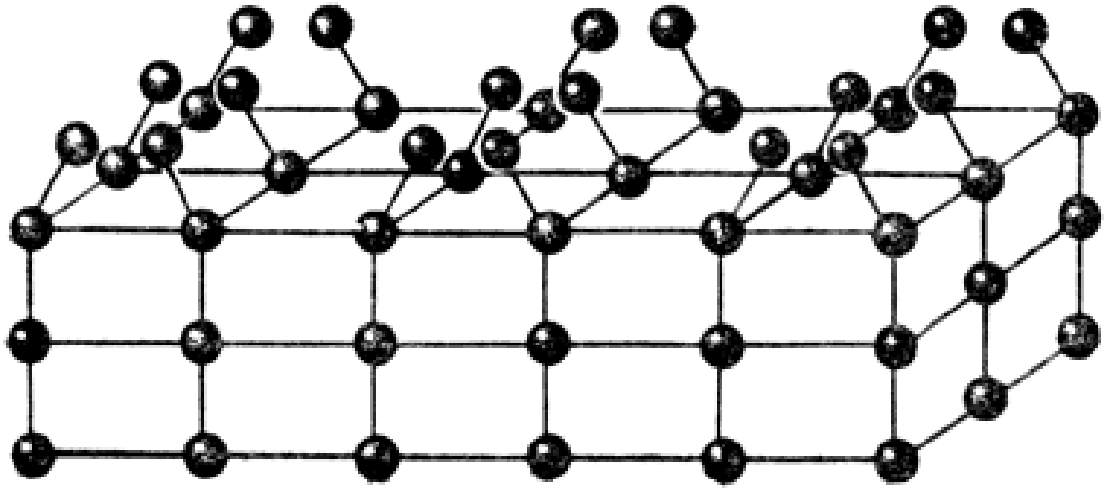


(*б*)

Объемное изображение нереконструированной Si(100)-(1x1) поверхности (*а*) и реконструированной Si(100)-(2x1) поверхности (*б*)

Электроника поверхности

2. Изменение атомной структуры поверхности



Пример реконструкции поверхностного слоя атомов с образованием димеров (перестройка 2×1).

Характер такой реконструкции показывает, что после нее поверхность фактически становится новой «фазой»

Электроника поверхности

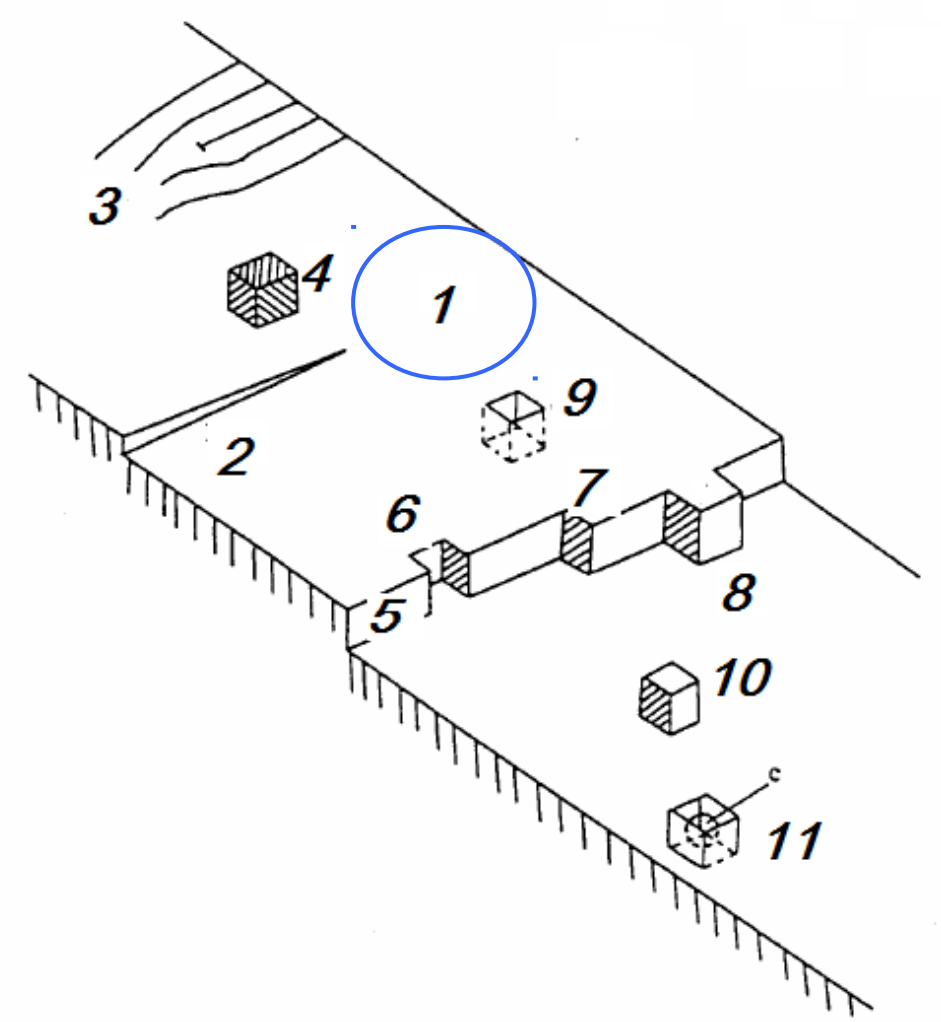


Рис. 2.18. Основные виды простых дефектов на вицинальных поверхностях с низкими значениями индексов Миллера - типа (100):

1 – совершенная плоская поверхность (грань) - *терраса*;

Электроника поверхности

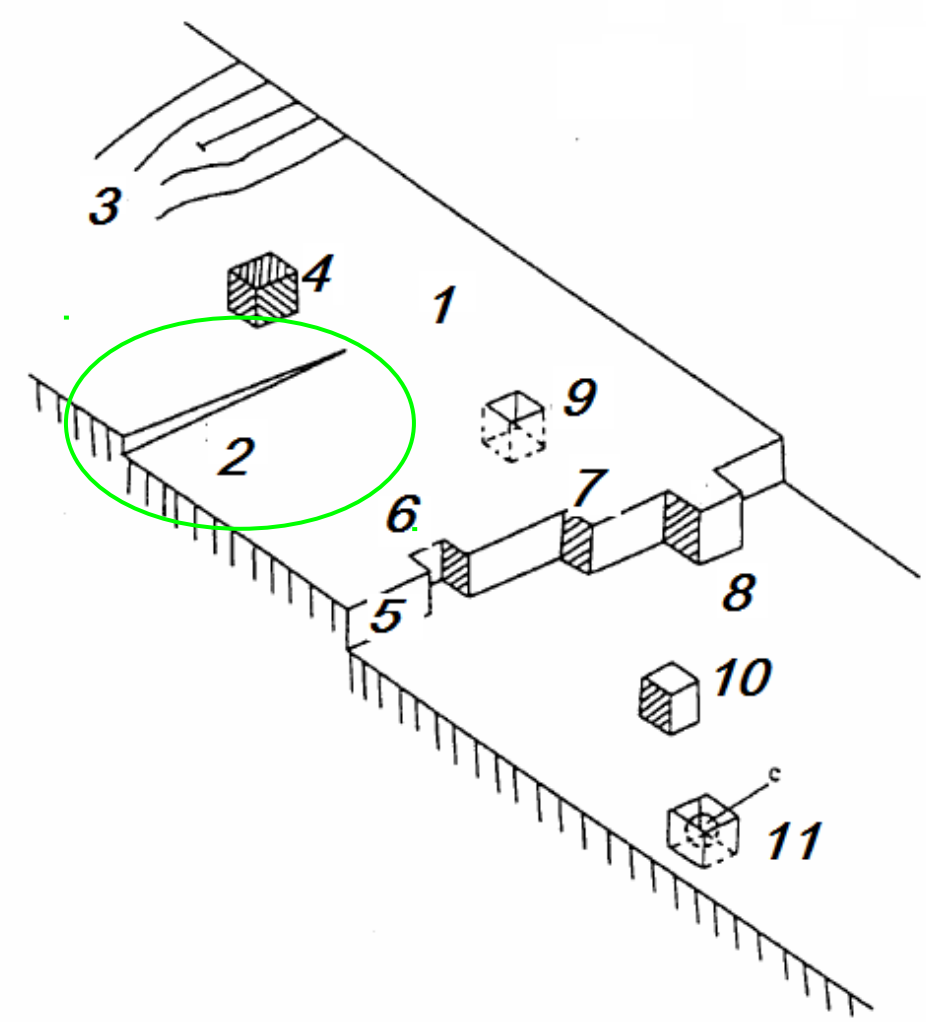


Рис. 2.18. Основные виды простых дефектов на вицинальных поверхностях с низкими значениями индексов Миллера - типа (100):

1 – совершенная плоская поверхность (грань) - *терраса*;

2 – выход *винтовой дислокации*;

Электроника поверхности

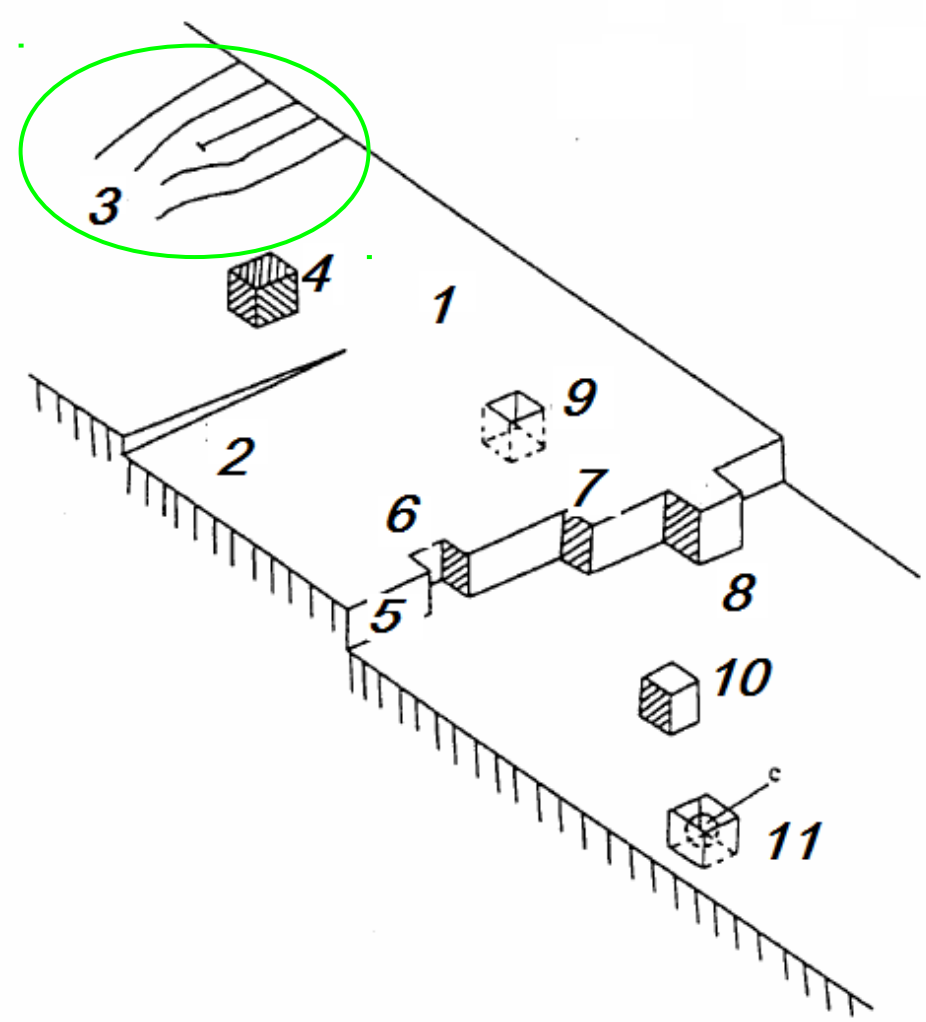


Рис. 2.18. Основные виды простых дефектов на вицинальных поверхностях с низкими значениями индексов Миллера - типа (100):

1 – совершенная плоская поверхность (грань) - *терраса*;

2 – выход *винтовой дислокации*;

3 – пересечение *краевой дислокации* с террасой;

Электроника поверхности

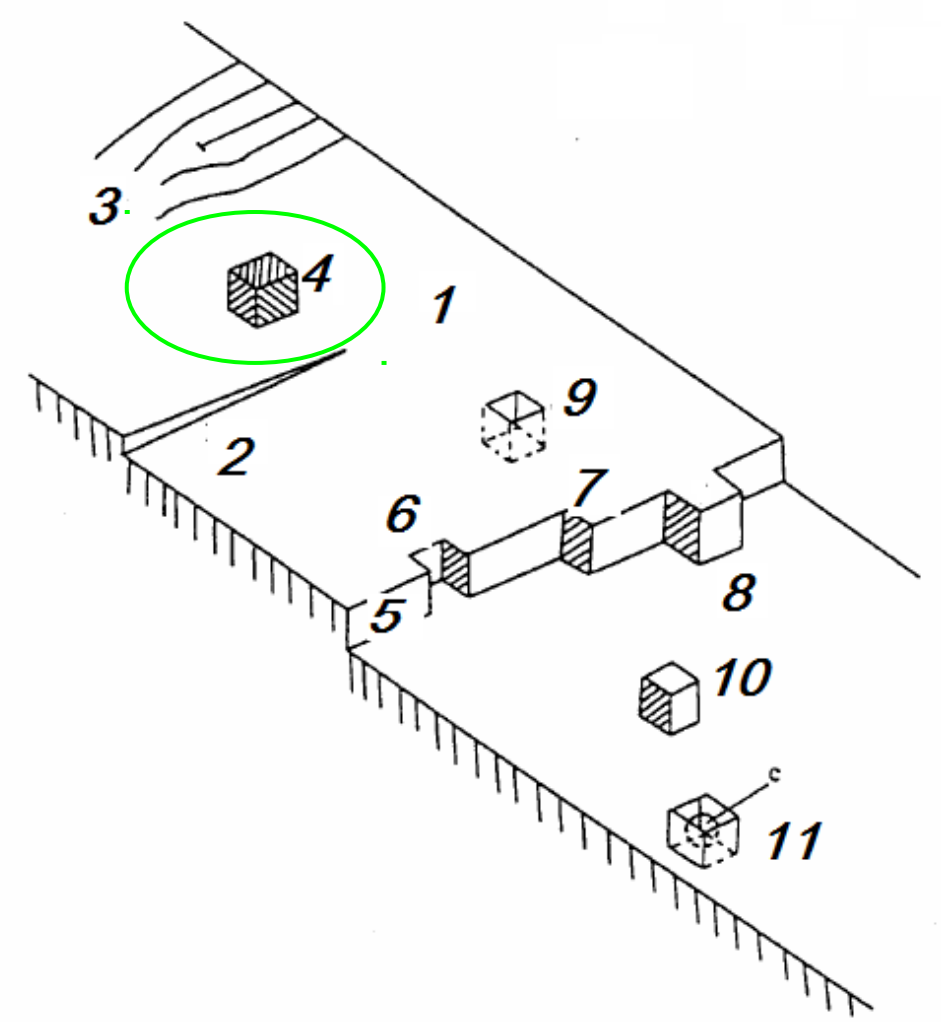


Рис. 2.18. Основные виды простых дефектов на вицинальных поверхностях с низкими значениями индексов Миллера - типа (100):

1 – совершенная плоская поверхность (грань) - *терраса*;

2 – выход *винтовой дислокации*;

3 – пересечение *краевой дислокации* с террасой;

4 – *адатом* примеси на террасе;

Электроника поверхности

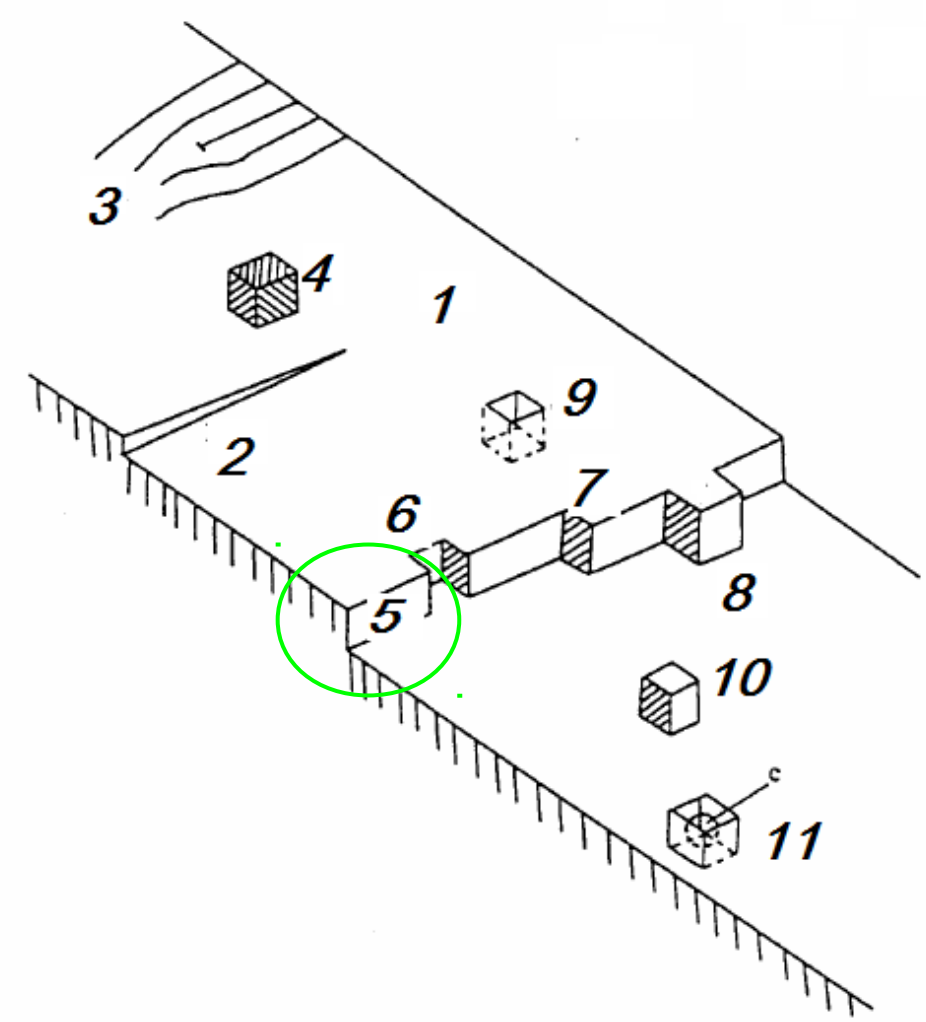


Рис. 2.18. Основные виды простых дефектов на вицинальных поверхностях с низкими значениями индексов Миллера - типа (100):

1 – совершенная плоская поверхность (грань) - *терраса*;

2 – выход *винтовой дислокации*;

3 – пересечение *краевой дислокации* с террасой;

4 – *адатом* примеси на террасе;

5 – моноатомная *ступенька*;

Электроника поверхности

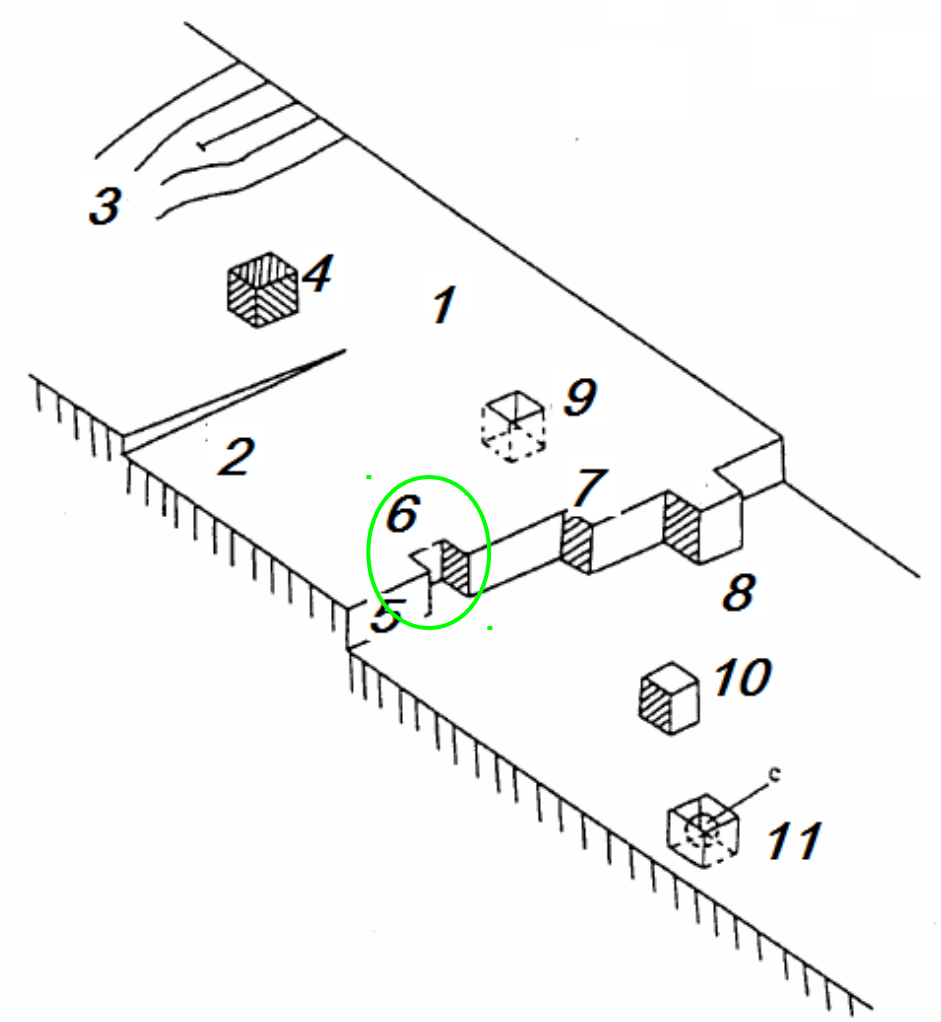


Рис. 2.18. Основные виды простых дефектов на вицинальных поверхностях с низкими значениями индексов Миллера - типа (100):

1 – совершенная плоская поверхность (грань) - *терраса*;

2 – выход *винтовой дислокации*;

3 – пересечение *краевой дислокации* с террасой;

4 – *адатом* примеси на террасе;

5 – моноатомная *ступенька*;

6 – *вакансия* в ступеньке;

Электроника поверхности

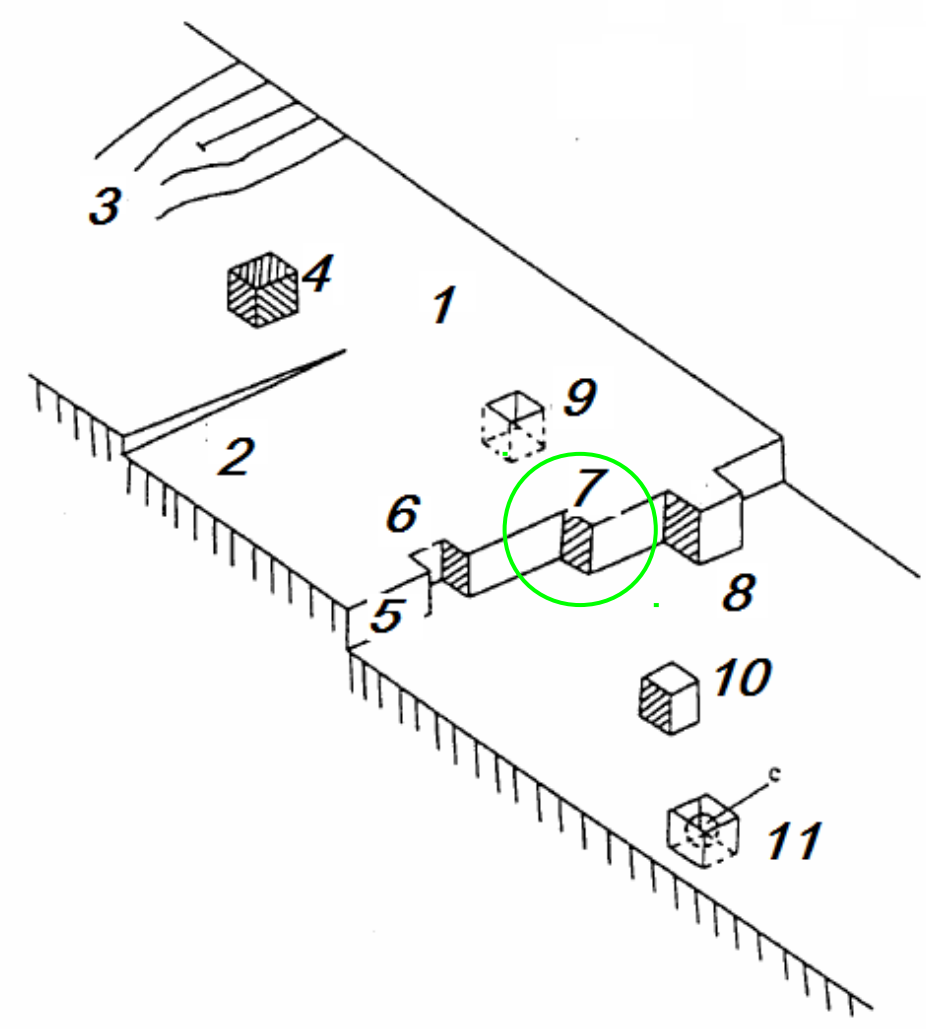


Рис. 2.18. Основные виды простых дефектов на вицинальных поверхностях с низкими значениями индексов Миллера - типа (100):

1 – совершенная плоская поверхность (грань) - *терраса*;

2 – выход *винтовой дислокации*;

3 – пересечение *краевой дислокации* с террасой;

4 – *адатом* примеси на террасе;

5 – моноатомная *ступенька*;

6 – *вакансия* в ступеньке;

7 – выступ в ступеньке – излом (*кинк*);

Электроника поверхности

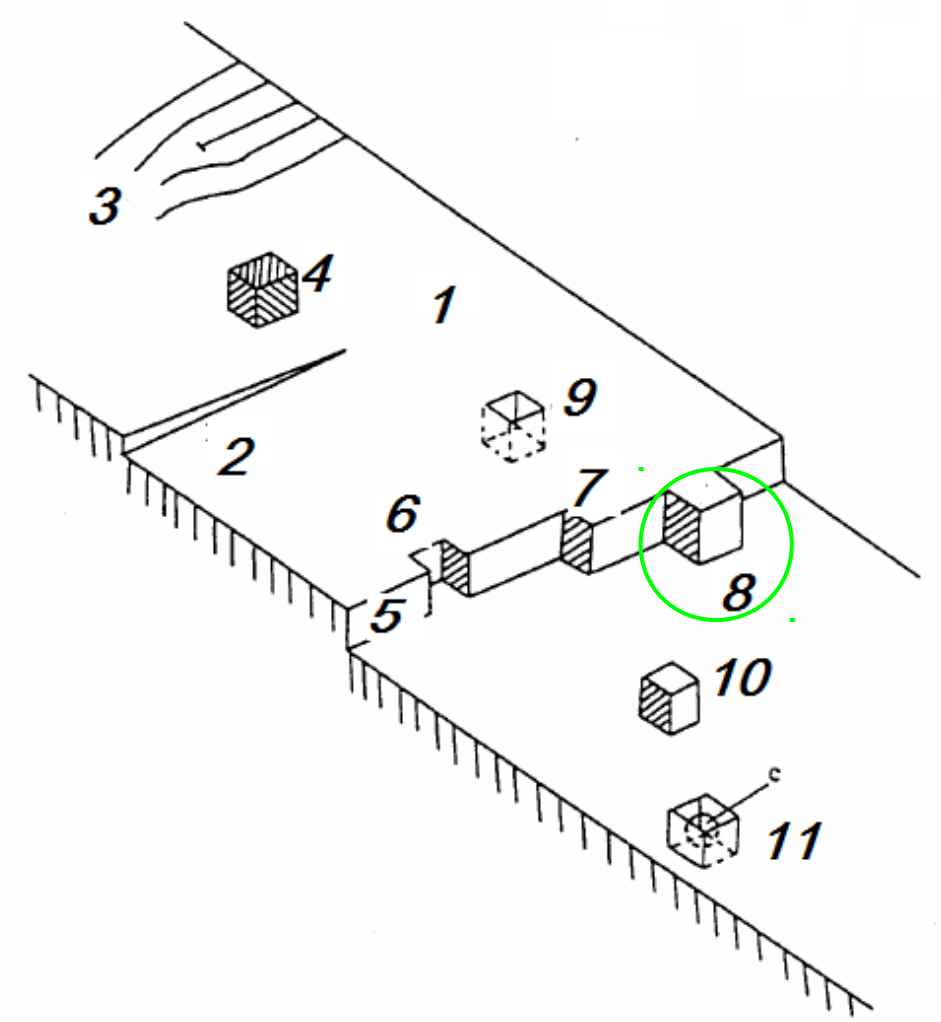


Рис. 2.18. Основные виды простых дефектов на вицинальных поверхностях с низкими значениями индексов Миллера - типа (100):

8 – *адатом* на ступеньке;

Электроника поверхности

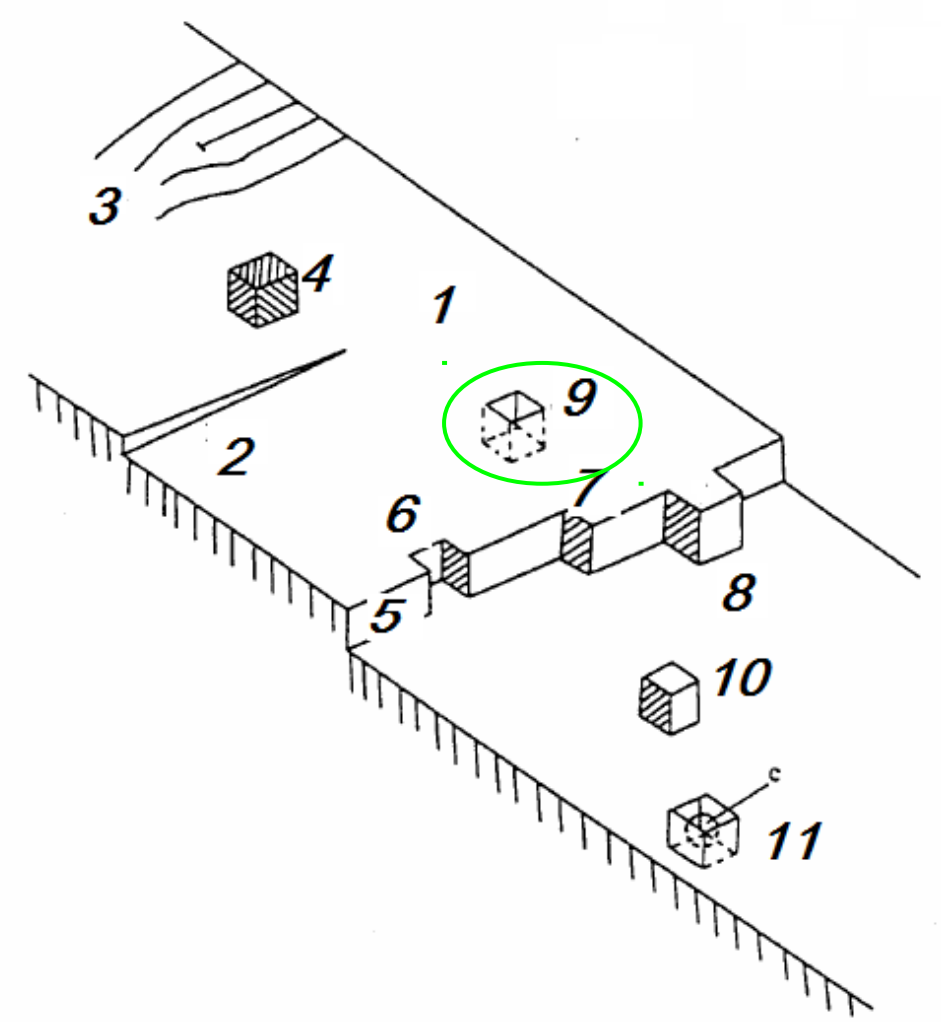


Рис. 2.18. Основные виды простых дефектов на вицинальных поверхностях с низкими значениями индексов Миллера - типа (100):

8 – *адатом* на ступеньке;
9 – *вакансия* в террасе;

Электроника поверхности

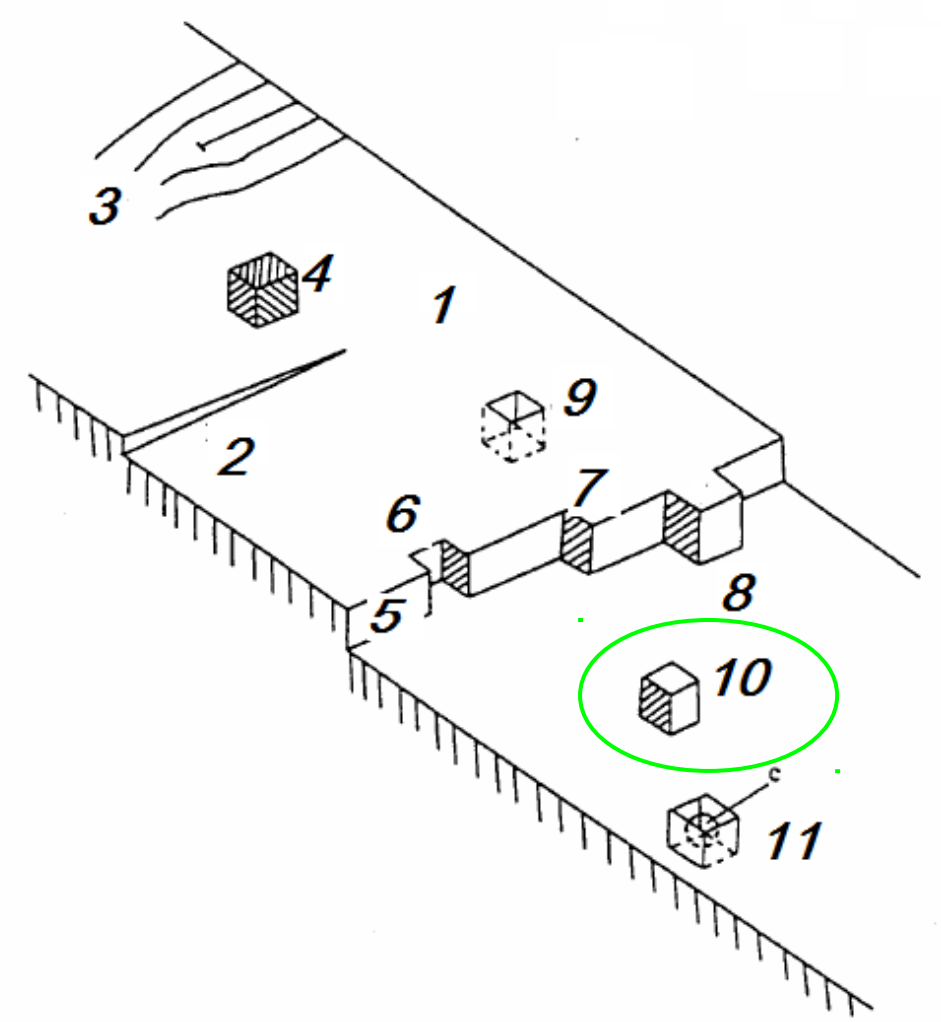


Рис. 2.18. Основные виды простых дефектов на вицинальных поверхностях с низкими значениями индексов Миллера - типа (100):

8 – *адатом* на ступеньке;
9 – *вакансия* в террасе;
10 – *адатом* в террасе;

Электроника поверхности

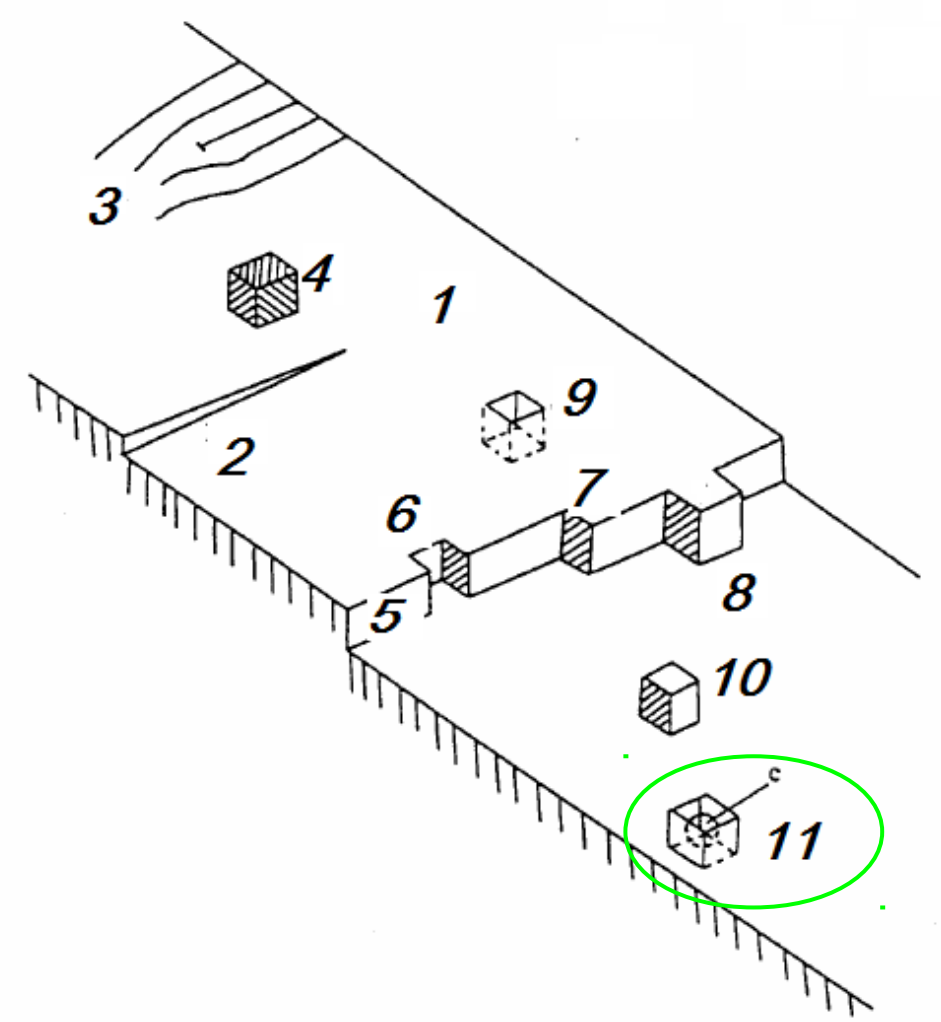
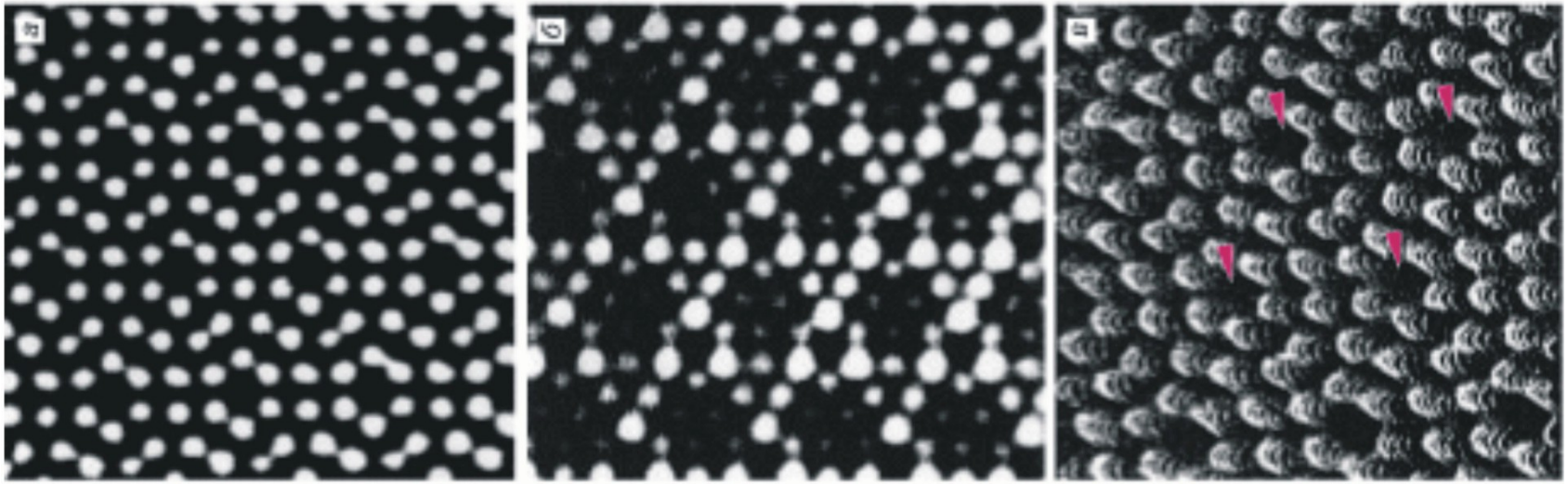


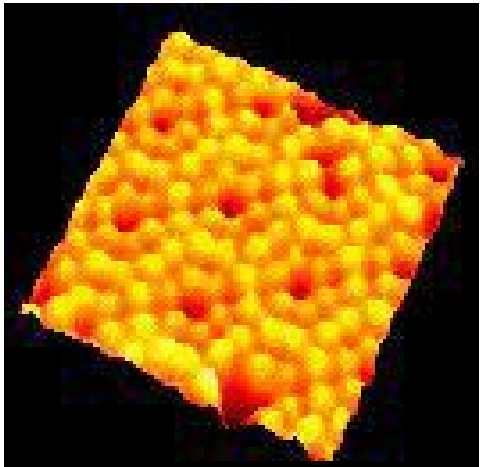
Рис. 2.18. Основные виды простых дефектов на вицинальных поверхностях с низкими значениями индексов Миллера - типа (100):

8 – *адатом* на ступеньке;
9 – *вакансия* в террасе;
10 – *адатом* в террасе;
11 - *вакансия* в террасе *с захваченным электроном* (F – центр в щелочно-галоид-ных кристаллах)

Электроника поверхности



СТМ изображения реконструированной поверхности Si(111) при разных напряжениях смещения

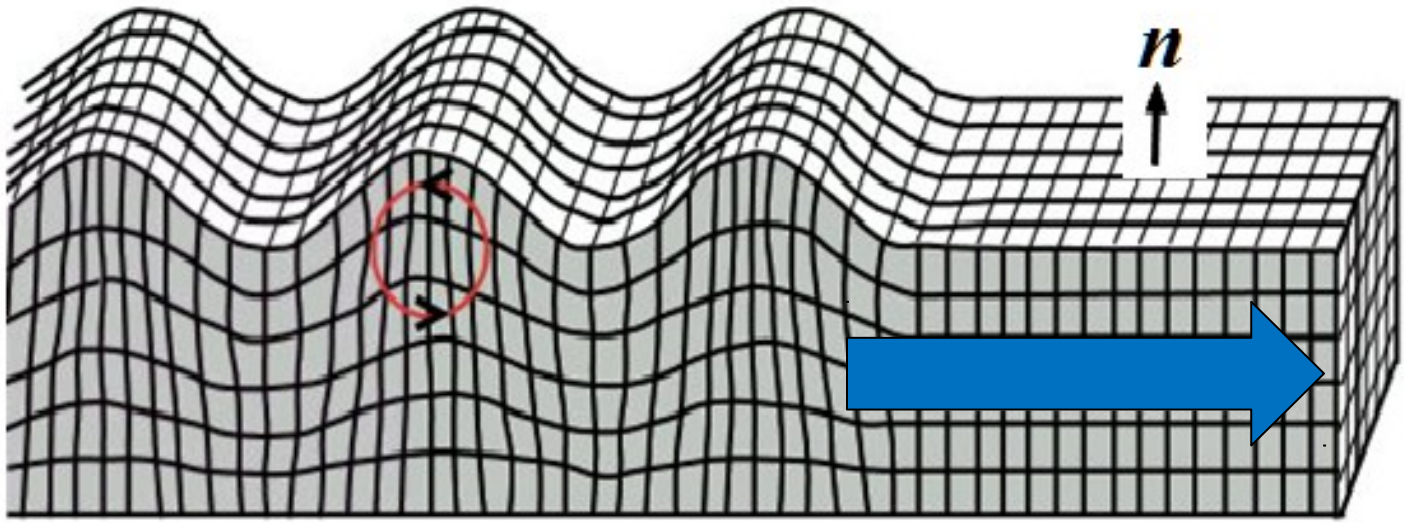


Электроника поверхности

3. Колебания атомов вблизи поверхности

Электроника поверхности

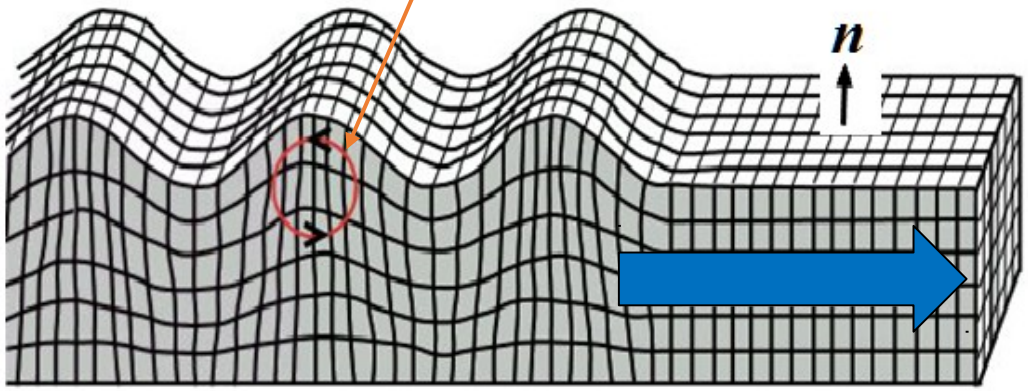
3. **Колебания атомов вблизи поверхности**



Волны плотности (по Релею) на поверхности полубесконечной упругой среды

Электроника поверхности

В результате частицы среды в такой волне описывают ***эллиптические траектории*** в плоскости



Волны плотности (по Релею) на поверхности полубесконечной упругой среды

Электроника поверхности

Оптические поверхностные волны

Другой класс длинноволновых поверхностных мод существует ***в ионных соединениях***, где объемные поперечные оптические (TO) и продольные оптические (LO) колебания вызывают ***появление осциллирующего дипольного момента*** в каждой элементарной ячейке кристалла.

Электроника поверхности

Существование поверхностных упругих волн в ультра- и гиперзвуковом диапазоне не только доказано экспериментально, они широко используются в **акусто-электронике**.

Электроника поверхности

По данным дифракции медленных (ДМЭ) электронов удалось оценить ***среднеквадратичные амплитуды колебаний поверхностных атомов*** $\langle x^2 \rangle$ и их анизотропию.

Электроника поверхности

Расчет $<x_s^2>$, $<x_p^2>$ и θ_D для широкого класса монокристаллов металлов и полупроводников показывает следующее:

$$< x_s^2> \approx 2\text{-}4 <x_v^2>;$$

$$<x_p^2> \approx 1{,}54 <x_V^2>$$

$$\theta_D^s \approx 0{,}5\theta_D^V$$

(θ_D^V для алмаза - 1860 К, для Si – 625 К, Ge - 360 К , W - 310К, Pt - 230К)

Качественно эти результаты указывают на ослабление упругих гармонических и ангармонических сил на поверхности решетки по сравнению с объемом

Электроника поверхности

Оценки проведенные на основе измерения интенсивности рефлексов ДМЭ и применение соотношения (2.33), показывают для поверхностной фазы:

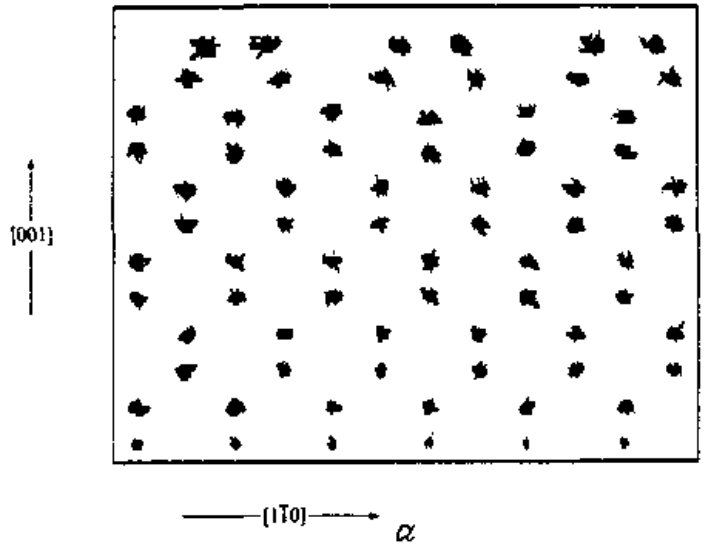
коэффициент теплового расширения

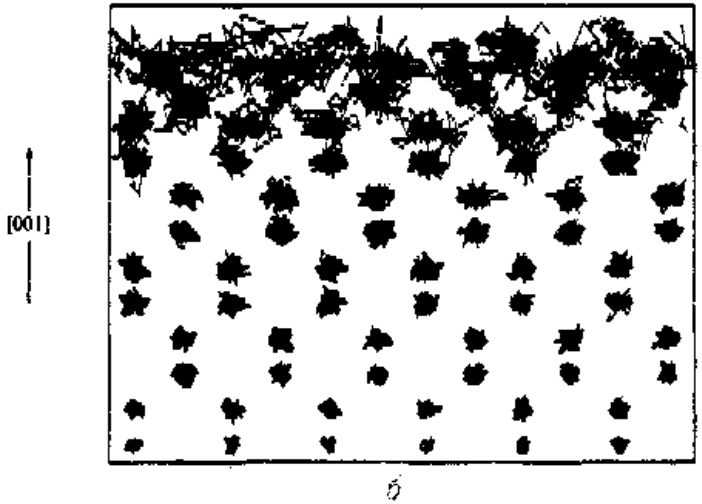
$$\alpha^s \approx 5\text{-}20\ \alpha^v$$

коэффициент теплопроводности

$$\chi^s_{реш} \approx 2\chi^v_{реш}.$$

Электроника поверхности





В результате затрудненного обмена колебательной энергией между поверхностью и объемом происходит

накопление энергии в поверхностной фазе

Картина начала приповерхностного плавления кремния согласно данным моделирования методом молекулярной динамики. Показаны траектории частиц (вид сбоку) при T = 1003 К (*а*) и при T = 1683 К (*б*).

Электроника поверхности

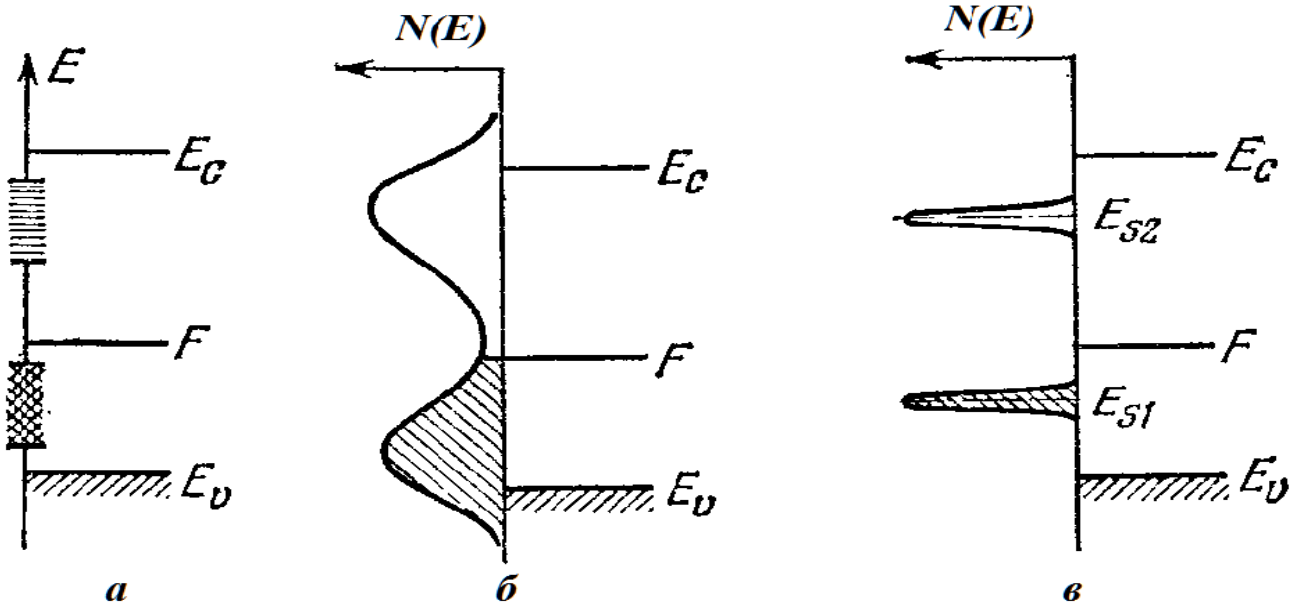
4. Изменение электронной структуры кристалла на поверхности (появление ПЭС)

Электроника поверхности

Появление дефектов на поверхности (оборванных связей, адсорбции атомов и др.) приводит к появлению локализованных **поверхностных электронных состояний** (ПЭС) в запрещенной зоне полупроводника

Электроника поверхности

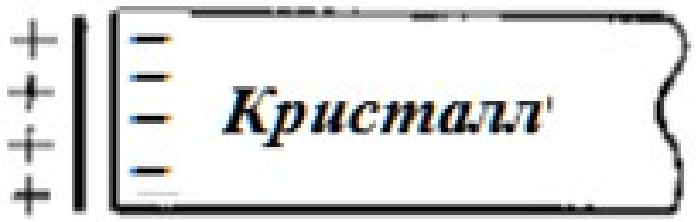
Появление дефектов на поверхности (оборванных связей, адсорбции атомов и др.) приводит к появлению локализованных **поверхностных электронных состояний** (ПЭС) в запрещенной зоне полупроводника



Поверхностные энергетические зоны (а) и плотности ПЭС при непрерывном (б) и квазидискретном (в) распределении поверхностных состояний

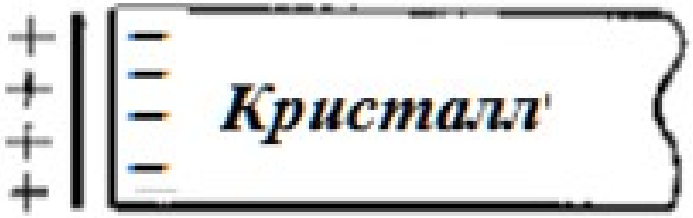
Электроника поверхности

При наличии заряженных *ПЭС* ввиду необходимости соблюдения условия электро-нейтральности полупроводникового кристалла в его подповерхностной области должен накапливаться "компенсирующий" заряд противоположного знака.



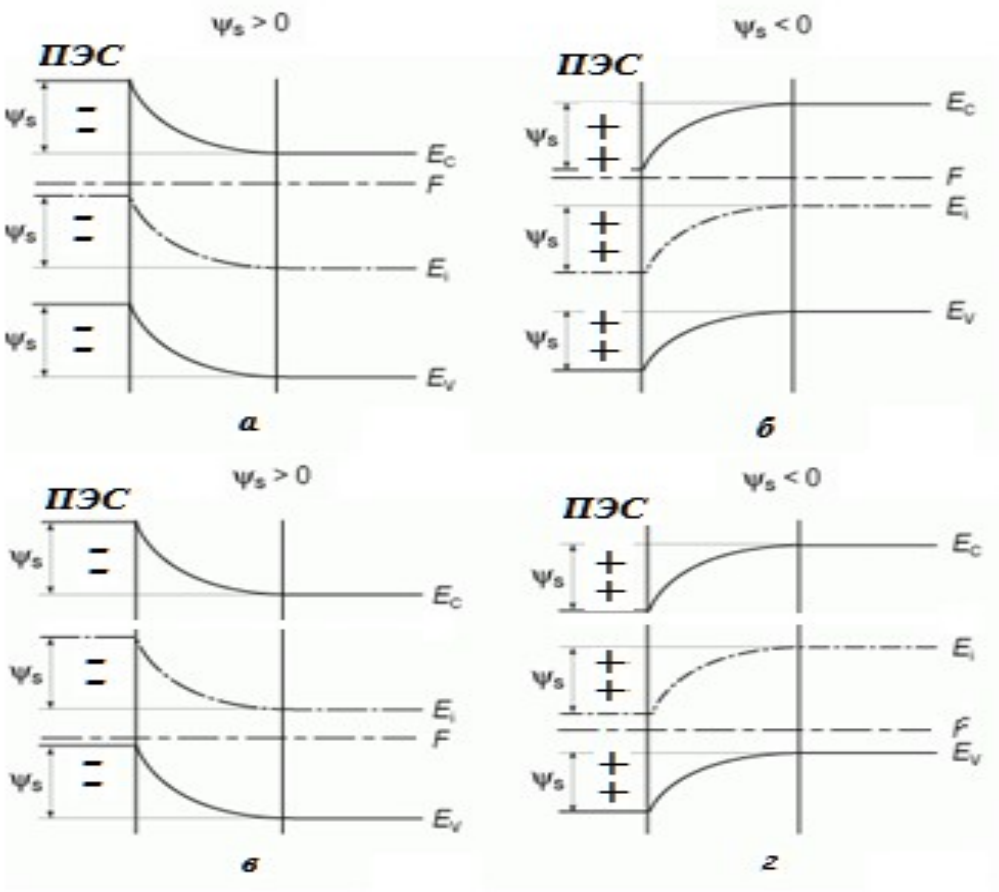
Электроника поверхности

При наличии заряженных *ПЭС* ввиду необходимости соблюдения условия электро-нейтральности полупроводникового кристалла в его подповерхностной области должен накапливаться "компенсирующий" заряд противоположного знака.



В результате под поверхностью возникает так называемая ***область пространственного заряда*** (***ОПЗ***).

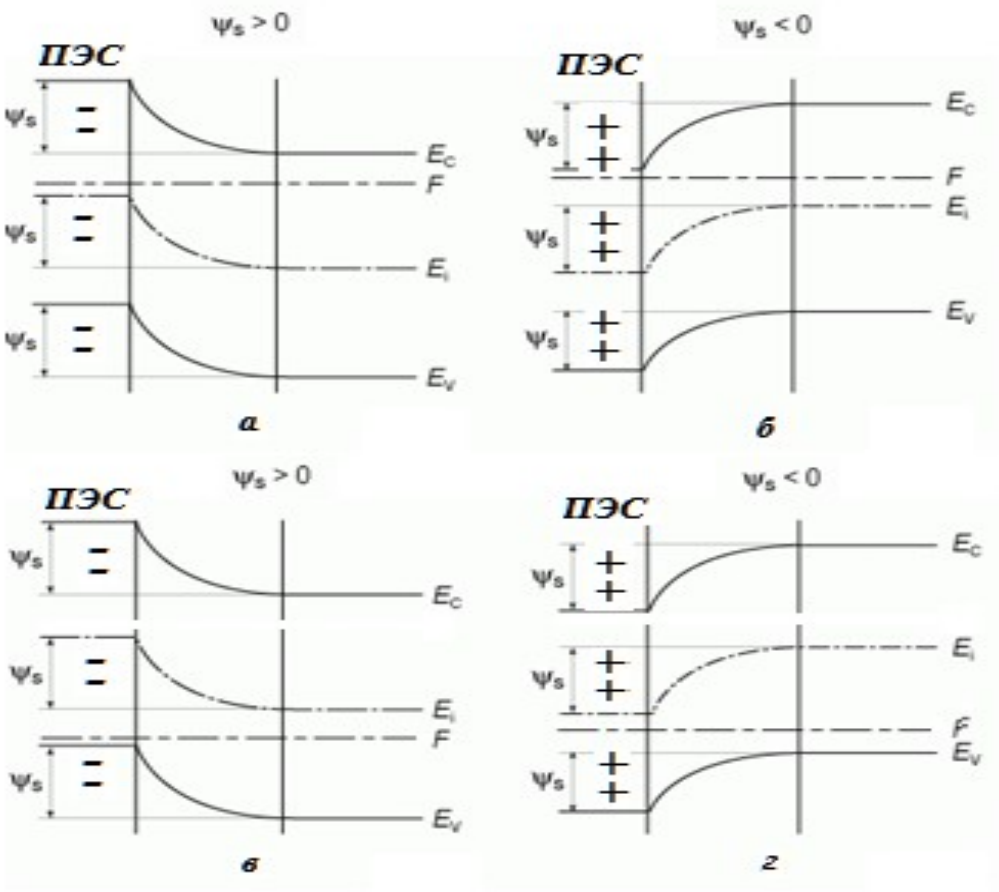
Электроника поверхности



Наличие ОПЗ вызывает изгиб энергетических зон вблизи поверхности

Изгиб энергетических зон вблизи поверхности полупроводников электронного (а, б) и дырочного (в, г) типов с донорно- (а, в) и акцепторноподобными (б, г) ПЭС

Электроника поверхности

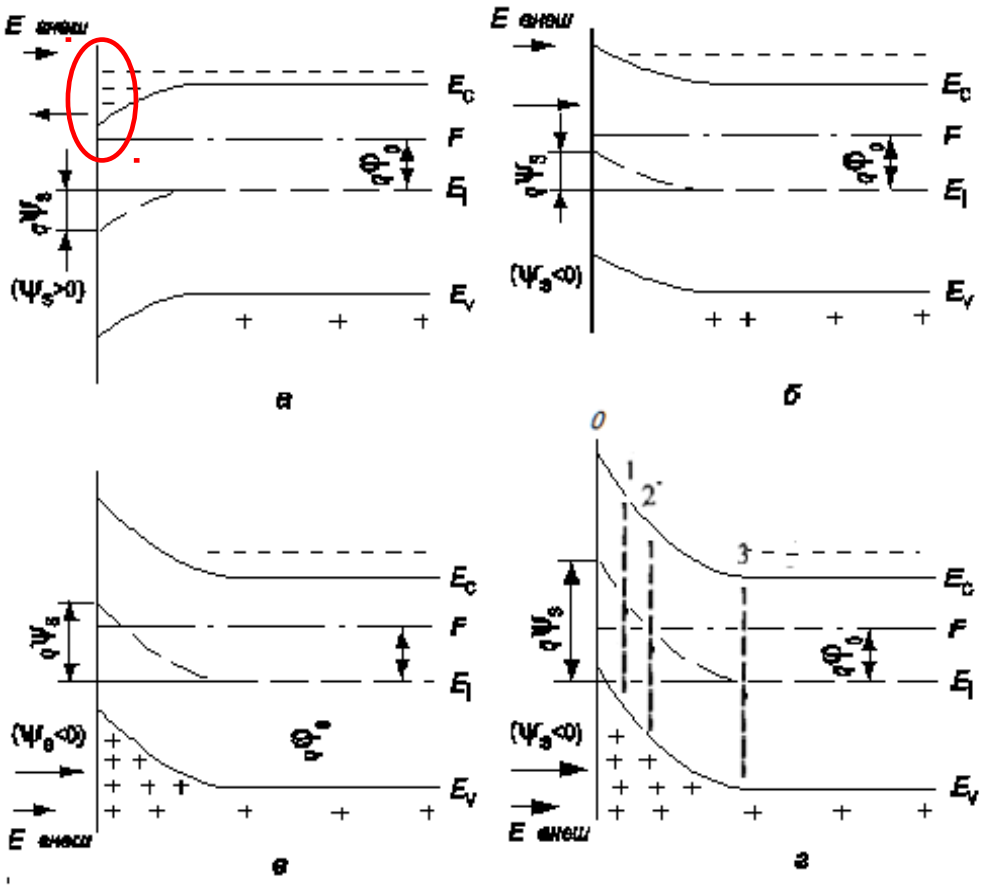


Виды ОПЗ:

- **Обогащение**
- **Обеднение**
- **Инверсия**

Изгиб энергетических зон вблизи поверхности полупроводников электронного (а, б) и дырочного (в, г) типов с донорно- (а, в) и акцепторноподобными (б, г) ПЭС

Электроника поверхности

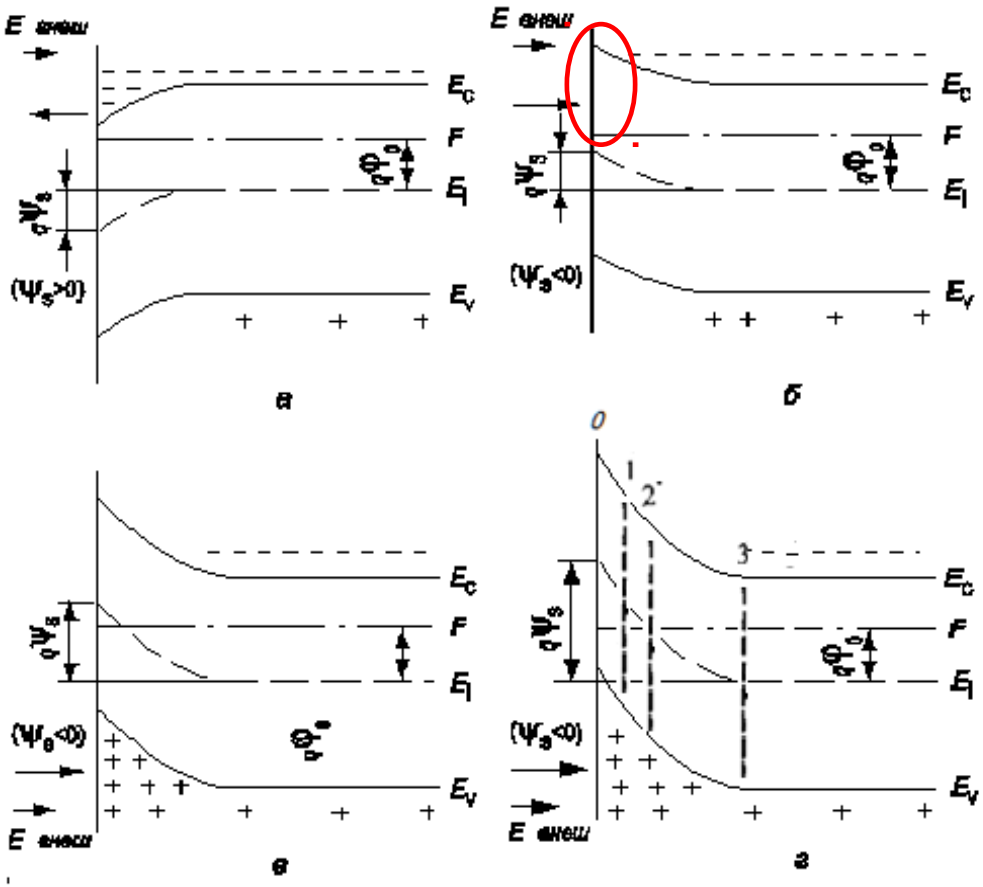


Примеры *ОПЗ* в кристалле n-типа:

(а) ***обога-щение*** для акцепторноподобых ПЭС;

Цифра-ми обозначены границы *ОПЗ* (3), слабой ин-версии (область 1-2), сильной инверсии (0-1) и область обеднения (2-3).

Электроника поверхности



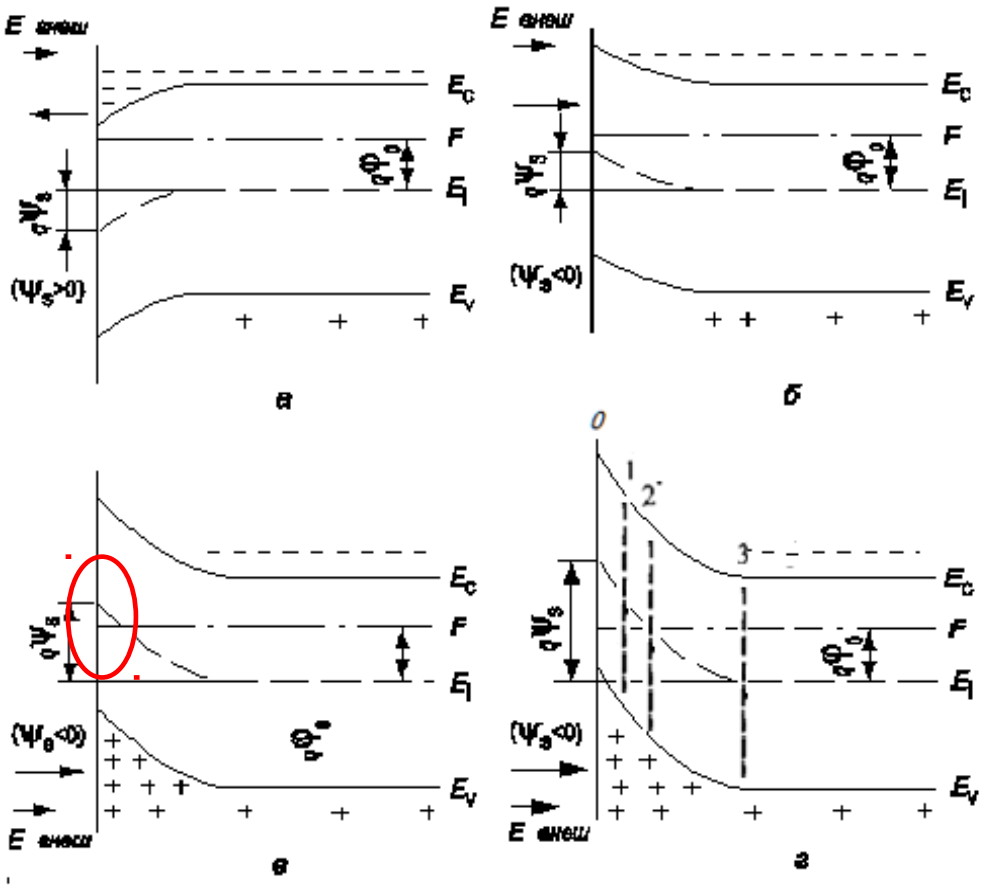
Примеры *ОПЗ* в кристалле n-типа:

(а) ***обога-щение*** для акцепторноподобых ПЭС;

(б) ***обеднение***,

Цифра-ми обозначены границы *ОПЗ* (3), слабой ин-версии (область 1-2), сильной инверсии (0-1) и область обеднения (2-3).

Электроника поверхности



Примеры *ОПЗ* в кристалле n-типа:

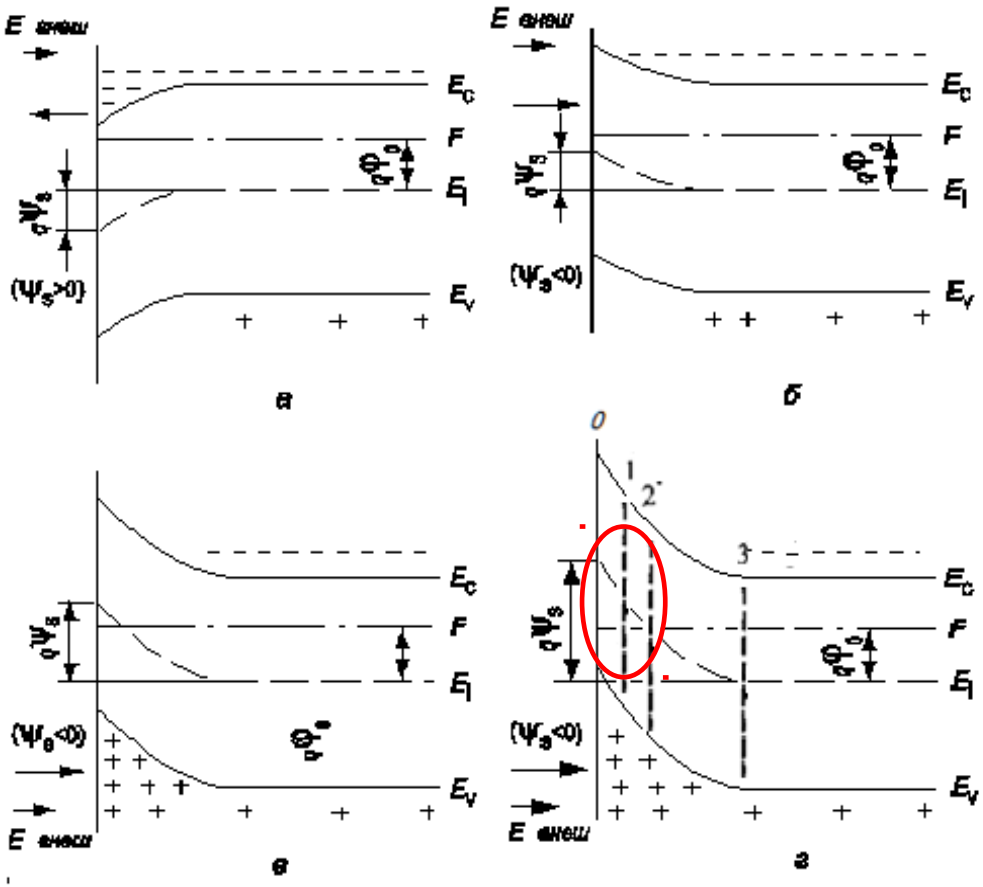
(а) ***обога-щение*** для акцепторноподобых ПЭС;

(б) ***обеднение***,

(в) ***слабая инверсия*** и

Цифра-ми обозначены границы *ОПЗ* (3), слабой ин-версии (область 1-2), сильной инверсии (0-1) и область обеднения (2-3).

Электроника поверхности



Примеры *ОПЗ* в кристалле n-типа:

(а) ***обога-щение*** для акцепторноподобых ПЭС;

(б) ***обеднение***,

(в) ***слаба*я *инверси*я** и

(г) ***сильная инверсия*** для донорноподобных ПЭС.

Цифра-ми обозначены границы *ОПЗ* (3), слабой ин-версии (область 1-2), сильной инверсии (0-1) и область обеднения (2-3).

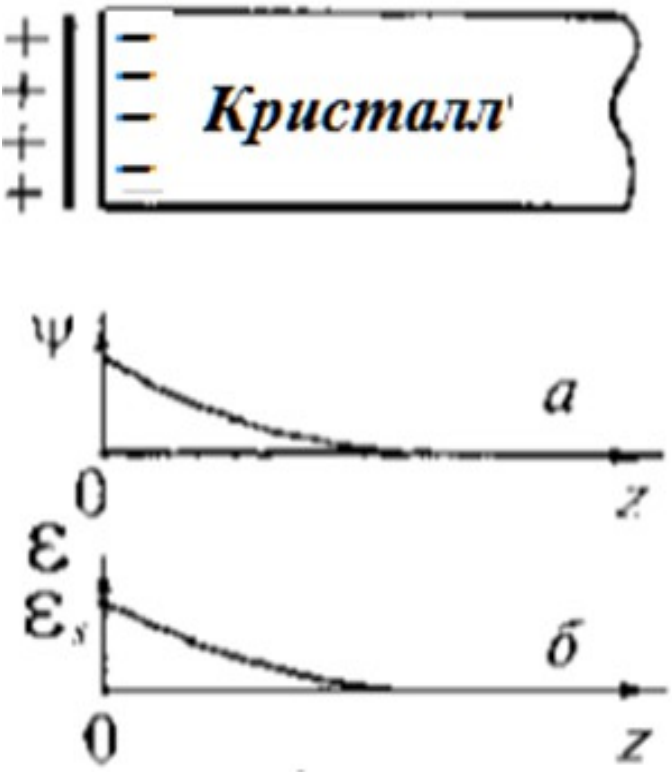
Электроника поверхности

Поверхност-ные избытки электронов Γ_n и дырок Γ_p определяются как ***избыточное их ко-личество, приходящееся на единичную поверх-ность кристалла***, по сравнению со случаем плоских зон для объема полупроводника (когда $n = n_o$ и $p = p_o$):

$$\Gamma_n = \int_0^\infty (n(z) - n_o)dz, \quad \Gamma_p = \int_0^\infty (p(z) - p_o)dz$$

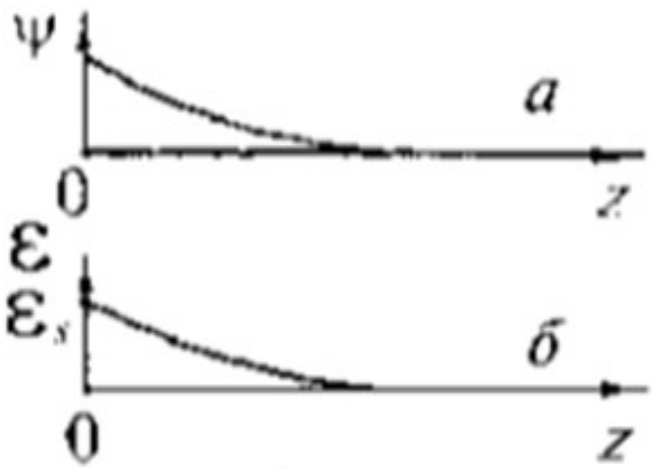
где $n(z)$ и $p(z)$ – концентрации электронов и дырок в ОПЗ, n_0 и p_0 – концентрация дырок в квазинейтральном объеме.

Электроника поверхности



Характер зависимостей электростатического потенциала от координаты $\psi = \frac{1}{q}\int_{\infty}^{z}\rho(z)dz$ *(а)*, напряженности электрического поля $\varepsilon(z) = (\rho(z)/2\varepsilon\varepsilon_o)$ *(б)* у поверхности собственного полупроводника в поле положительно заряженной поверхности, созданном акцепторноподобными ПЭС

Электроника поверхности



Уравнения:

$$\psi = \frac{1}{q}\int_{\infty}^{z}(z)dz$$

$$\varepsilon(z) = (\rho(z)/2\varepsilon\varepsilon_o)$$

$$\frac{d^2\psi}{dz^2} = -\frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0}\rho(z)$$

$$\rho(z) = q\left[p(z) - n(z) + N_D^+(z) - N_A^-(z)\right]$$

$$n(z) = n_0 \cdot \exp(q\psi/kT) = n_0 \cdot \exp(Y)$$

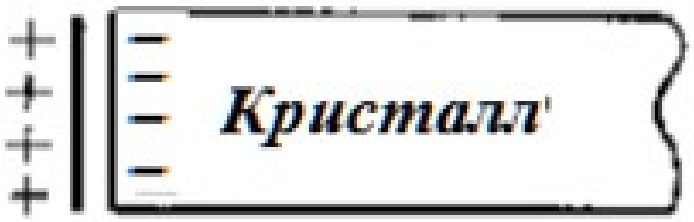
$$p(z) = p_0 \cdot \exp(-q\psi/kT) = p_0 \cdot \exp(-Y)$$

$$Y(z) = q\psi(z)/kT$$

Электроника поверхности

При выполнении условия электронейтральности кристалла заряд *ОПЗ* скомпенсирован таким же по величине, но противоположным по знаку за-рядом на его поверхности.

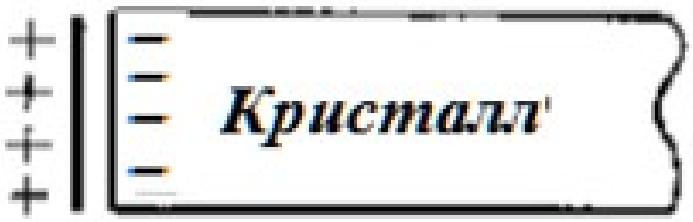
Такая система являет-ся аналогом конденсатора, одна "обкладка" кото-рого - поверхность кристалла, а другая – нейтральный объем кристалла.



Электроника поверхности

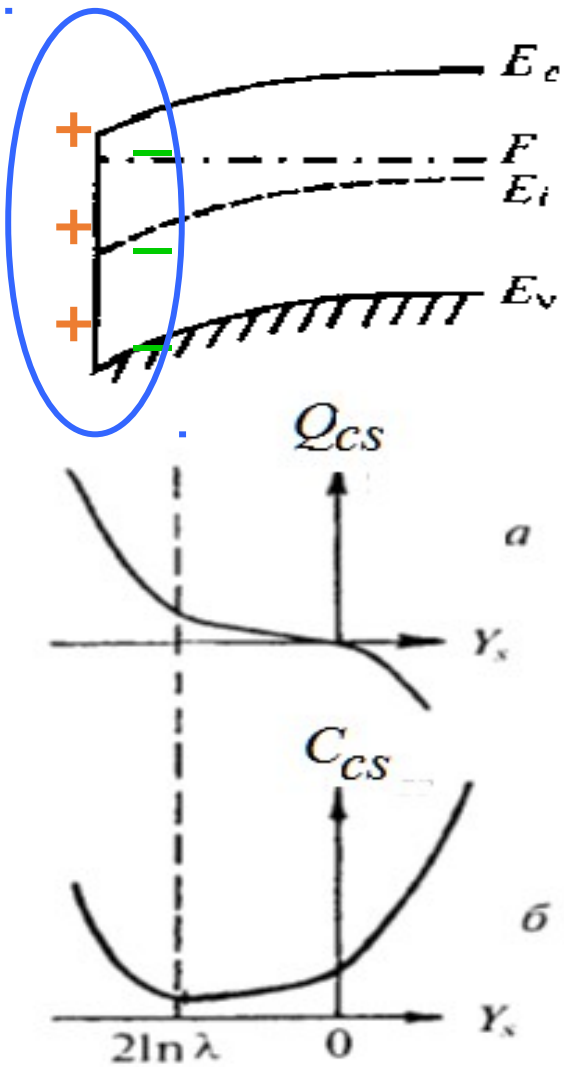
При выполнении условия электронейтральности кристалла заряд *ОПЗ* скомпенсирован таким же по величине, но противоположным по знаку за-рядом на его поверхности.

Такая система являет-ся аналогом конденсатора, одна "обкладка" кото-рого - поверхность кристалла, а другая – нейтральный объем кристалла.



Отличие от обычного плоского конденсатора:
заряд такого «конденсатора» (*ОПЗ* + *ПЭС*) распределен в про-странстве

Электроника поверхности

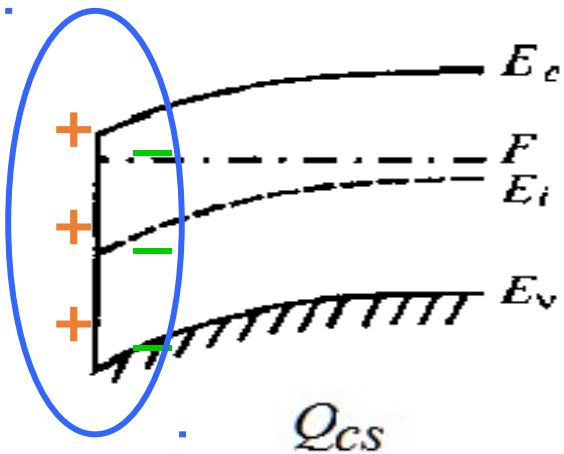


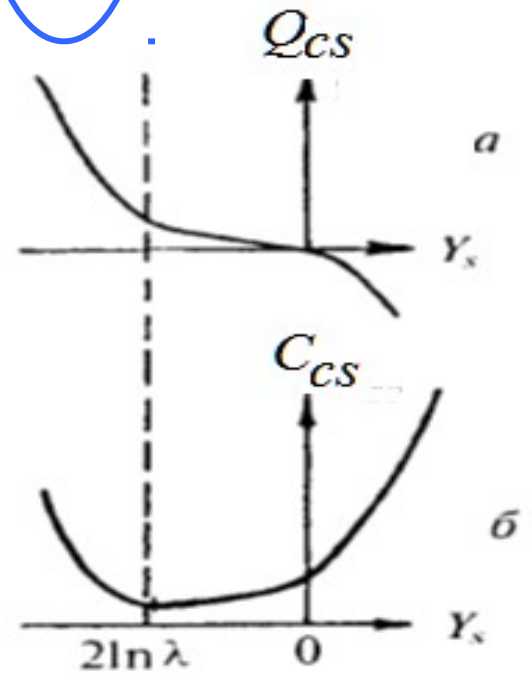
По этой причине емкость конденсатора "поверхность - *ОПЗ*" характеризуют дифферен-циальной емкостью:

$$C_{sc} = -\frac{dQ_{sc}}{d\psi_s} = -\frac{q}{kT}\frac{dQ_{sc}}{dY_s}$$

$$Y_S = q\Psi_s/kT$$

Электроника поверхности





$$C_{sc} = -\frac{dQ_{sc}}{d\psi_s} = -\frac{q}{kT}\frac{dQ_{sc}}{dY_s}$$

$$C_{sc} = \varepsilon_0 \varepsilon / W_{ef}$$

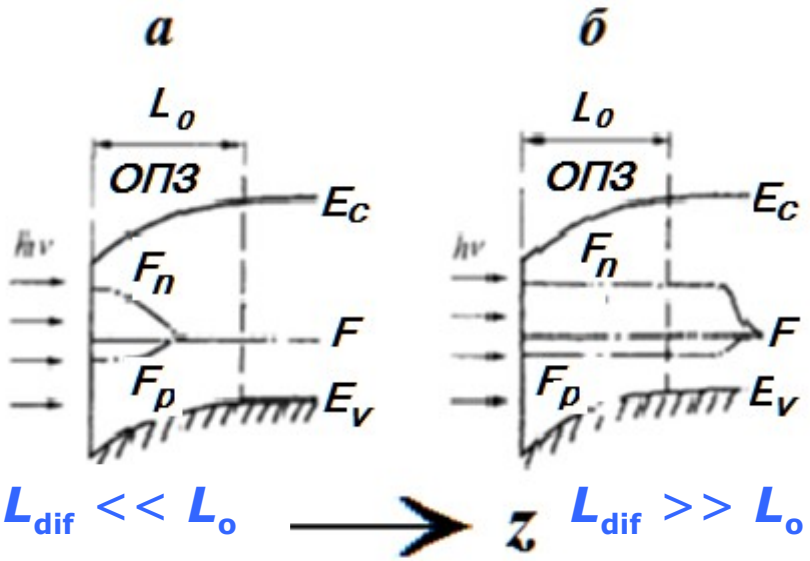
W_{ef} - эффективная ширина *ОПЗ*

$$Y_S = q\Psi_s/kT$$

Электроника поверхности

ОПЗ в условиях квазиравновесия

При анализе неравновесных процессов в приповерхностных слоях часто приходит-ся сталкиваться генерацией носителей заряда у поверхности (на-пример, при освещении полупроводника)

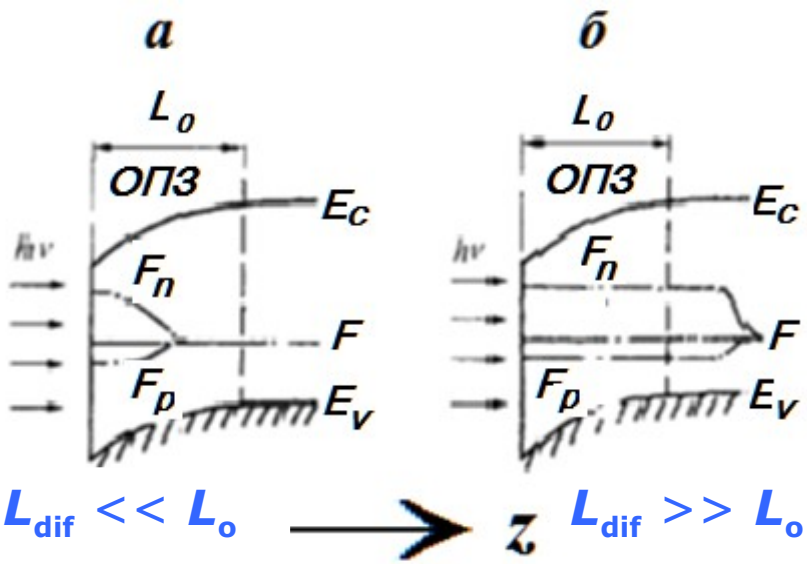


Положения квазиуровней Ферми $F_n(z)$ и $F_p(z)$ в *ОПЗ* при освещении полупроводника для случаев $L_{dif} \leq L_o$ (а) и $L_{dif} > L_o$ (б)

Электроника поверхности

ОПЗ в условиях квазиравновесия

При анализе неравновесных процессов в приповерхностных слоях часто приходит-ся сталкиваться генерацией носителей заряда у поверхности (на-пример, при освещении полупроводника)



В этом случаев приповерхностном слое толщи-ной h_o = (10÷100) нм генерируются электронно-дырочные пары, которые затем диффундируют вглубь кристалла на величину, называемому длиной диффузии

$$L_{dif} = \sqrt{D\tau_r}$$

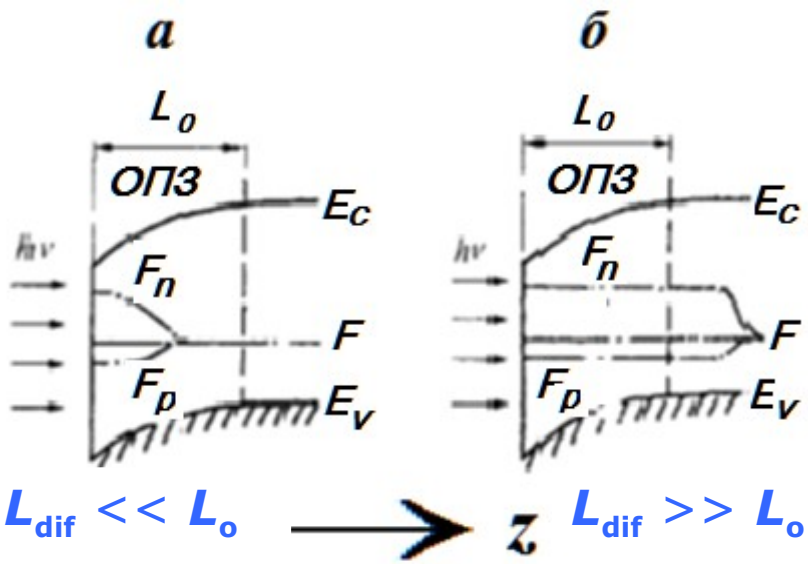
D - коэффициент амбиполярной диффузии, приблизительно равный коэффициенту диффузии неосновных носи-телей заряда.

Положения квазиуровней Ферми $F_n(z)$ и $F_p(z)$ в *ОПЗ* при освещении полупроводника для случаев $L_{dif} \leq L_o$ (а) и $L_{dif} > L_o$ (б)

Электроника поверхности

ОПЗ в условиях квазиравновесия

При анализе неравновесных процессов в приповерхностных слоях часто приходит-ся сталкиваться генерацией носителей заряда у поверхности (на-пример, при освещении полупроводника)



Квазиравновесие достигается тогда, когда *распределение по энергиям равновесных* ("тепловых") *и неравновесных* (например, «фотовозбужденных» или «горячих») *носителей заряда* в разрешенных зонах *идентичны*.

Положения квазиуровней Ферми $F_n(z)$ и $F_p(z)$ в *ОПЗ* при освещении полупроводника для случаев $L_{dif} \leq L_o$ (а) и $L_{dif} > L_o$ (б)

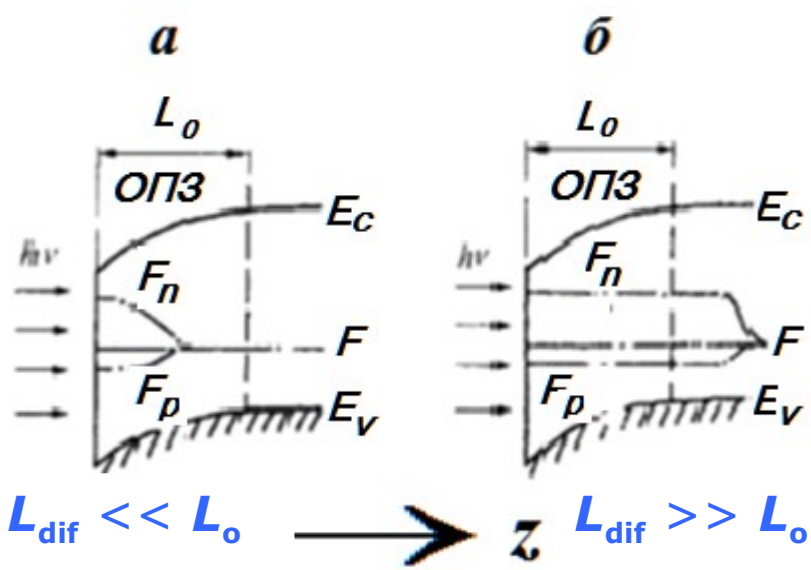
Электроника поверхности

ОПЗ в условиях квазиравновесия

Формулы:

$$n^*(z) = N_C \cdot \exp\left[\frac{F_n - E_c(z)}{kT}\right] = n_0^* \cdot e^{Y^*}$$

$$p^*(z) = N_V \cdot \exp\left[\frac{E_v(z) - F_p}{kT}\right] = p_0^* \cdot e^{-Y^*}$$



Положения квазиуровней Ферми $F_n(z)$ и $F_p(z)$ в *ОПЗ* при освещении полупроводника для случаев $L_{dif} \leq L_o$ (а) и $L_{dif} > L_o$ (б)

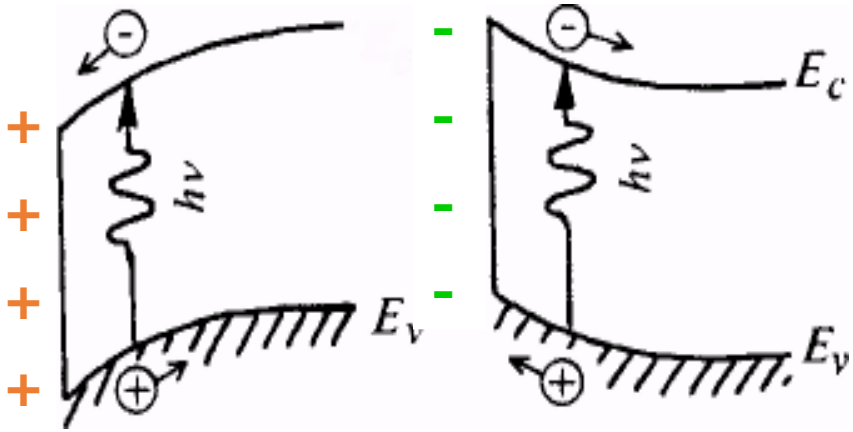
Электроника поверхности

5. Изменение свойств кристалла из-за влияния поверхности (классические и квантовые размерные эффекты)

Электроника поверхности

Поверхностная фотоэдс при квазиравновесии в ОПЗ

Поверхностной фотоэдс называют дополнительную разность потенциалов, которая возникает между поверхностью и объемом кристалла в результате освещениия полупроводника



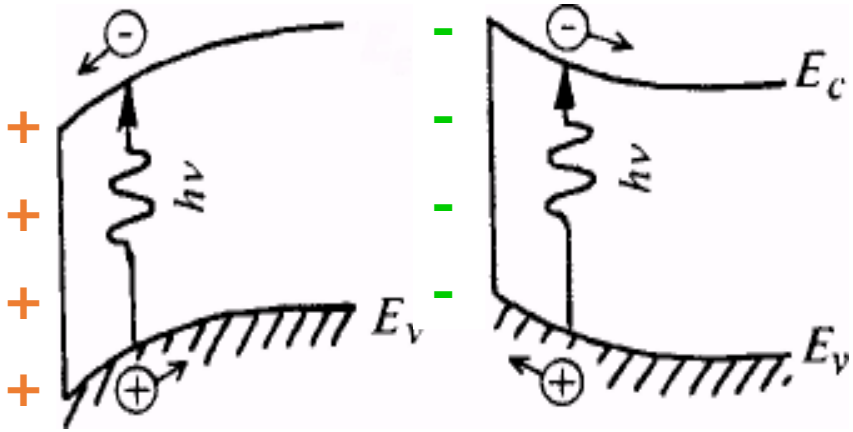
Механизм формирования фотоЭДС ОПЗ при различных изгибах зон

Электроника поверхности

Поверхностная фотоэдс при квазиравновесии в ОПЗ

Поверхностной фотоэдс называют дополнительную разность потенциалов, которая возникает между поверхностью и объемом кристалла в результате освещениия полупроводника

Существует три основных типа *поверхностной фотоЭДС:*



1. Разделение генерируемых электроннодырочных пар электричес-ким полем ОПЗ (барьерная фотоэдс).

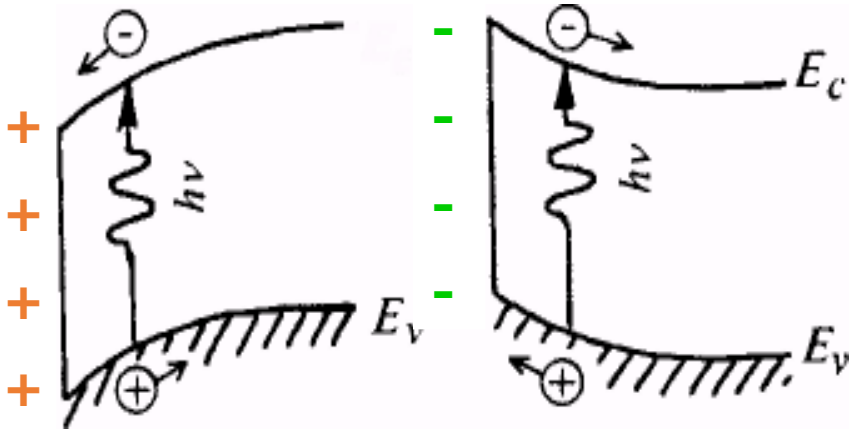
Механизм формирования фотоЭДС ОПЗ при различных изгибах зон

Электроника поверхности

Поверхностная фотоэдс при квазиравновесии в ОПЗ

Поверхностной фотоэдс называют дополнительную разность потенциалов, которая возникает между поверхностью и объемом кристалла в результате освещениия полупроводника

Существует три основных типа *поверхностной фотоЭДС:*



1. Разделение генерируемых электроннодырочных пар электричес-ким полем ОПЗ (барьерная фотоэдс).

2. Амбиполярная диффузия электронно-дырочных пар из области генерации - тонкого приповерхностного слоя - в объем (фотоэдс Дембера).

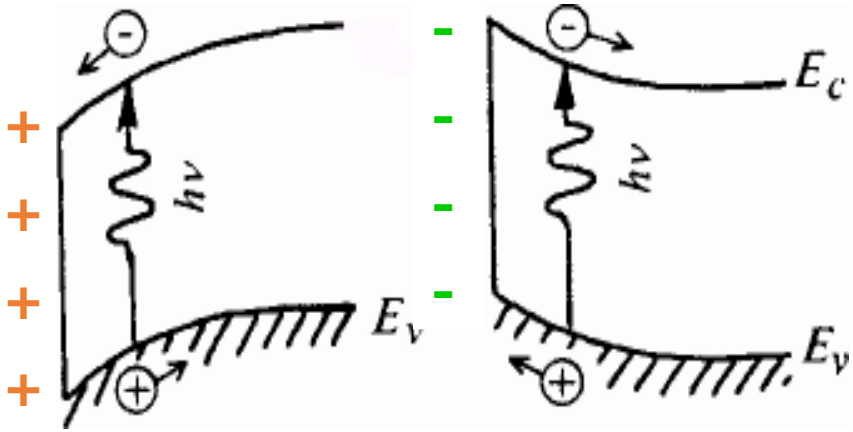
Механизм формирования фотоЭДС ОПЗ при различных изгибах зон

Электроника поверхности

Поверхностная фотоэдс при квазиравновесии в ОПЗ

Поверхностной фотоэдс называют дополнительную разность потенциалов, которая возникает между поверхностью и объемом кристалла в результате освещениия полупроводника

Существует три основных типа *поверхностной фотоЭДС:*



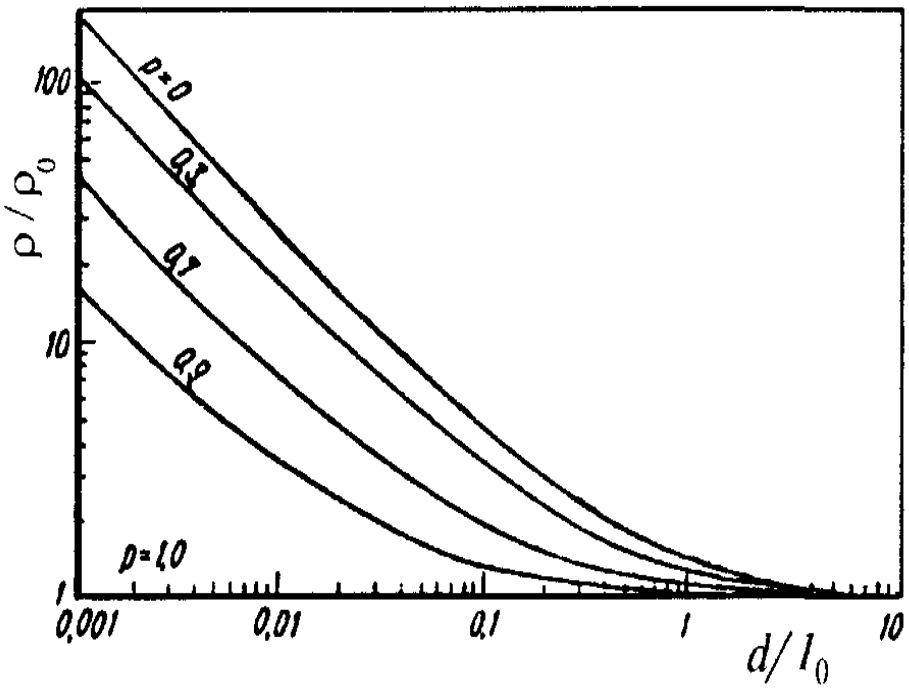
1. Разделение генерируемых электроннодырочных пар электричес-ким полем ОПЗ (барьерная фотоэдс).
2. Амбиполярная диффузия электронно-дырочных пар из области генерации - тонкого приповерхностного слоя - в объем (фотоэдс Дембера).
3. Перезарядка ПЭС в результате освещения.

Механизм формирования фотоЭДС ОПЗ при различных изгибах зон

Электроника поверхности

Классический размерный эффект

При $l_o \leq d$ удельная электропроводность металли-ческих пленок или проволок снижается при уменьшении их толщины.

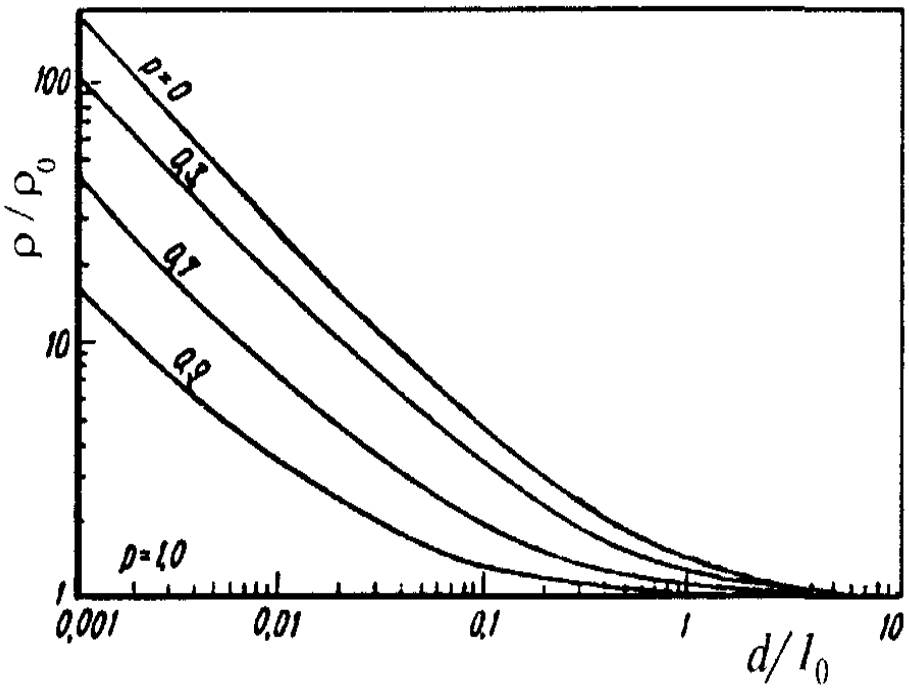


Зависимость нормированного удельного сопротивления ρ/ρ_0 от толщины d пленки, нормированной на длину свободного пробега электрона l_0. Здесь ρ_0 – удельное сопротивление массивного материала, а параметр кривых – коэффициент зеркальности P.

Электроника поверхности

Классический размерный эффект

$$\sigma/\sigma_0 \cong 1 - 3(1-P)/8(d/l_0),$$

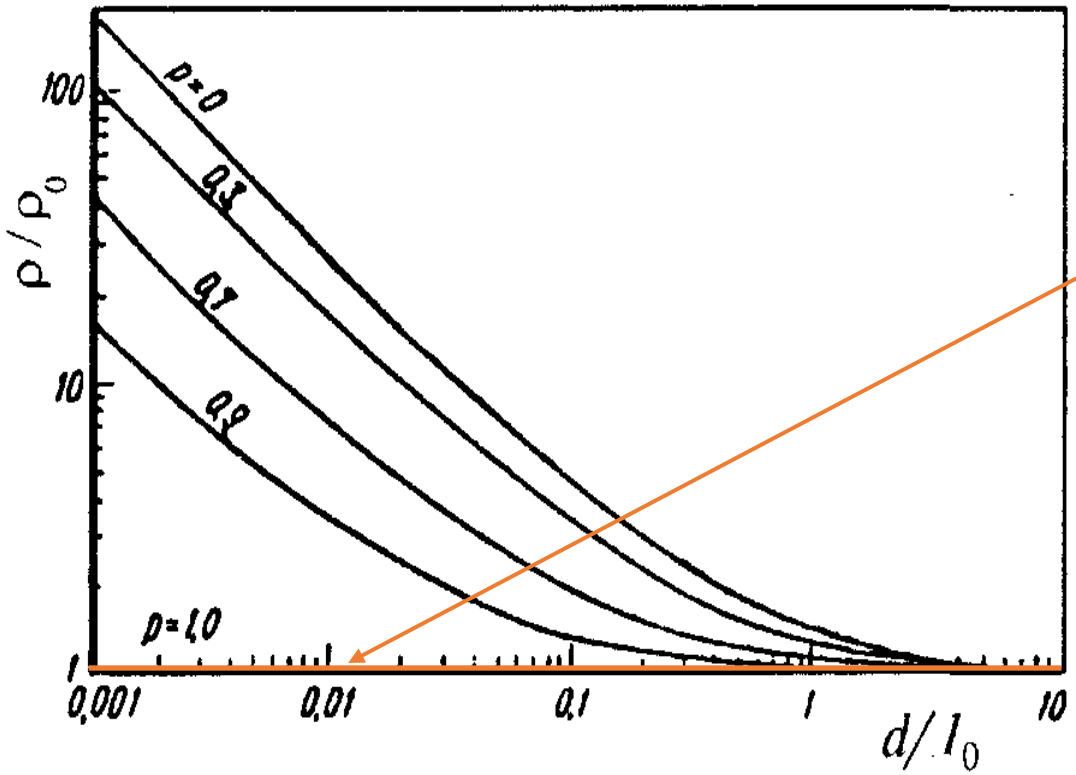


При $l_0 \leq d$ удельная электропроводность металли-ческих пленок или проволок снижается при уменьшении их толщины.

Все особенности взаимодействия электронов с поверхностью в теории Фукса описываются единственным феноменологическим параметром – *коэффициентом зеркальности* (*отражения*) *P*.

Зависимость нормированного удельного сопротивления ρ/ρ_0 от толщины *d* пленки, нормированной на длину свободного пробега электрона l_0. Здесь ρ_0 – удельное сопротивление массивного материала, а параметр кривых – коэффициент зеркальности *P*.

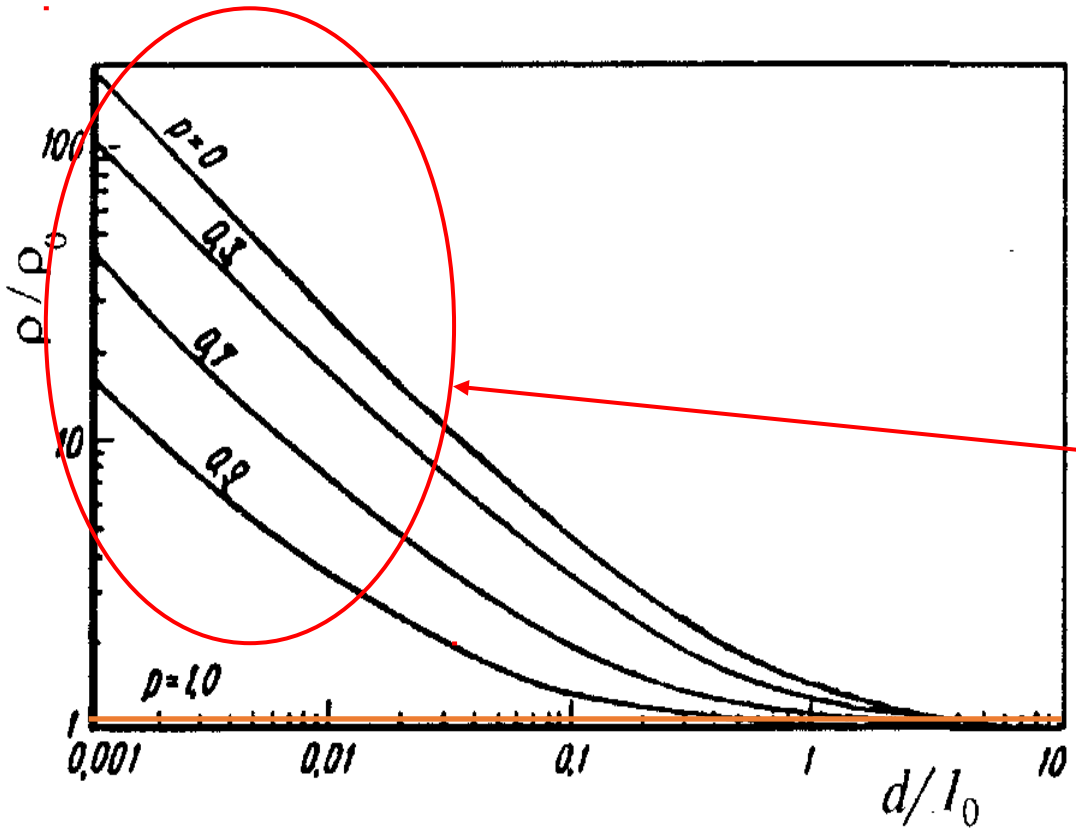
Электроника поверхности



Согласно теории Фукса, при полностью зеркальном рассеянии (P=1) размерного эффекта вообще нет.

Зависимость нормированного удельного сопротивления ρ/ρ_0 от толщины *d* пленки, нормированной на длину свободного пробега электрона l_0. Здесь ρ_0 – удельное сопротивление массивного материала, а параметр кривых – коэффициент зеркальности *P*.

Электроника поверхности



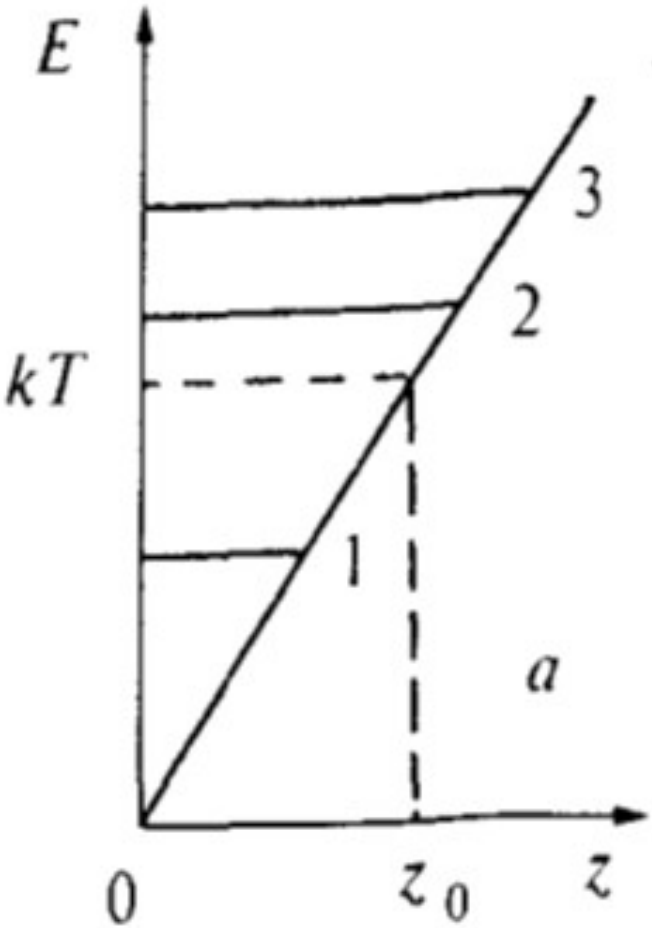
Согласно теории Фукса, при полностью зеркальном рассеянии (P=1) размерного эффекта вообще нет.

Диффузное рассеяние (P = 0) может приводить к возрастанию удельного сопротивления ρ на порядки.

Зависимость нормированного удельного сопротивления ρ/ρ_0 от толщины d пленки, нормированной на длину свободного пробега электрона l_0. Здесь ρ_0 – удельное сопротивление массивного материала, а параметр кривых – коэффициент зеркальности P.

Электроника поверхности

Квантовый размерный эффект

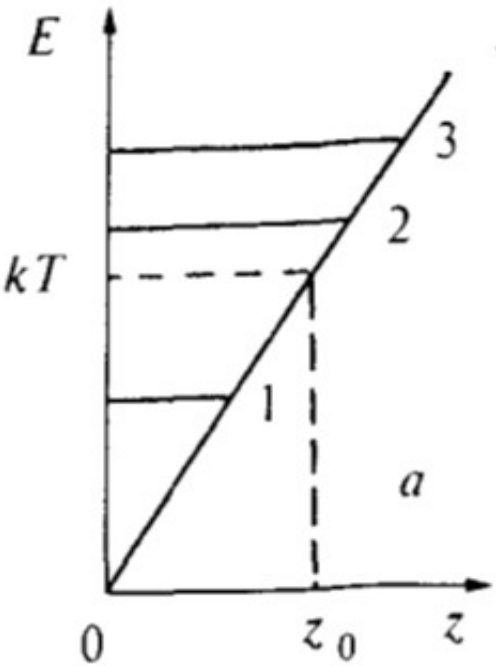


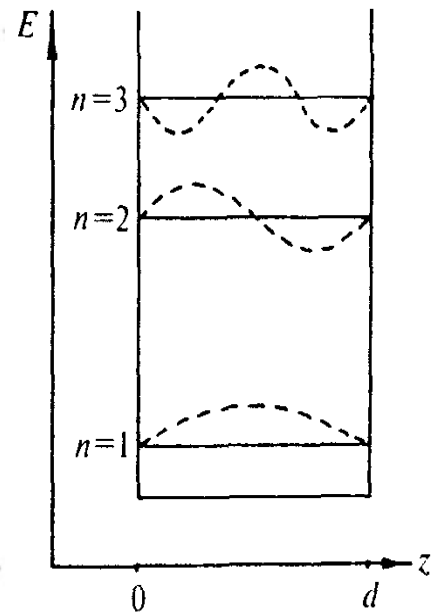
В полупроводниковых пленках с поверхностью на классический размерный эффект накладывается квантово-размерный эффект, когда толщина ОПЗ становится сопоставимой с длиной волны де-Бройля электронов:

$$\lambda_B = 2\pi\hbar / \sqrt{2m^* E_F}$$

Электроника поверхности

Квантовый размерный эффект





Движение свободных носителей заряда в тонком слое ОПЗ вдоль оси *z* (по нормали к поверхности ОПЗ) ограничено условием образования стоячих волн де Бройля при $z_0 \le \lambda_B$

$$\lambda_B \equiv 2\pi\hbar / \sqrt{2m^* E_F}$$

$$z_0 \le n\lambda_B/2$$

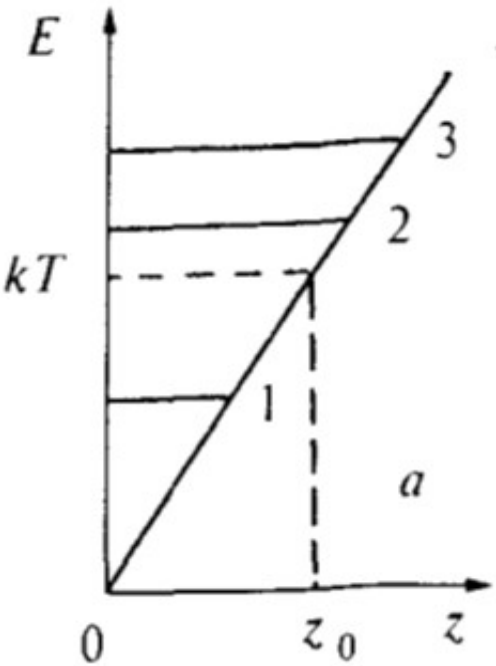
$E = h\omega$

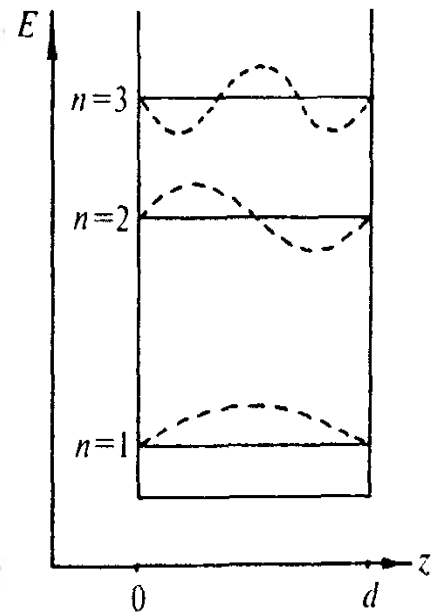
$P = hk$

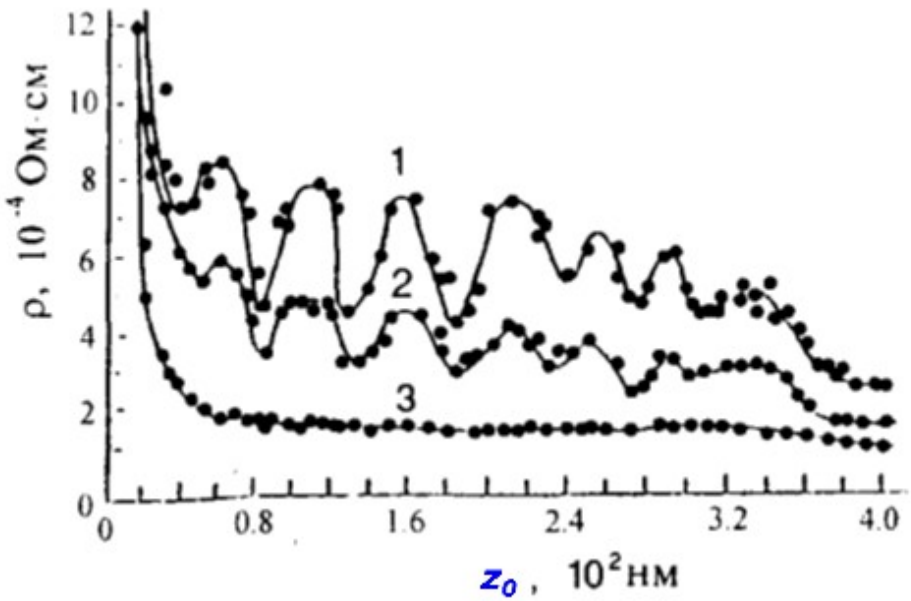
Квантование энергетического спектра электронов в ОПЗ. Пунктирные линии – соответствующие волновые функции электронов

Электроника поверхности

Квантовый размерный эффект







$E = h\omega$

$P = hk$

$$\lambda_B \equiv 2\pi\hbar / \sqrt{2m^* E_F}$$

$$z_0 \leq n\lambda_B/2$$

Квантование энергетического спектра электронов в ОПЗ. Пунктирные линии – соответствующие волновые функции электронов

Электроника поверхности

Благодарю за внимание !