

Opakovanie

1. Podľa akého kritéria sme rozdelili tvorbu vrstiev na hrubé a tenké?
2. Ak ponoríme zlatý a medený predmet do roztoku dusičnanu strieborného, na ktorý z nich sa nanesie striebro?
3. Je možné elektrochemicky pokoviť dielektrické materiály? Ako?
4. Ktorá z metód je vhodná pre priame vytvorenie štrukturovanej vrstvy: spin-coating, dip-coating alebo sieťotlač?
5. Čo musí platiť pre zmenu Gibbsovej energie G , aby bola chemická premena (reakcia) spontánna?
6. Je možné uskutočniť CVD iba s jediným prekurzorom? Ako?
7. Ak by som chcel vytvoriť materiál s ideálnou kryštalickou štruktúrou bez defektov, ktoré metódy (aspoň dve) by bolo vhodné použiť.
8. Aký vzťah musí platiť medzi prekurzormi A a B pri depozícii metódou ALD?
9. Čím je možné regulovať efúzny tok z Knudsenovej cely pri MBE?
10. Ktoré deponované častice majú vyššiu kinetickú energiu – pri naparovaní alebo pri naprašovaní?

Lekcia 3

Úvod do fyziky povrchov

- Čo sa deje pri „lepení“ atómov na povrch

Vzájomné interakcie atómov (molekúl)

Keď k sebe približujeme dva atómy, najprv sa priťahujú (*van der Waalsova príťažlivá sila*) a potom odpudzujú (*Pauliho odpudivá sila – prekryv elektrónových orbitálov*).

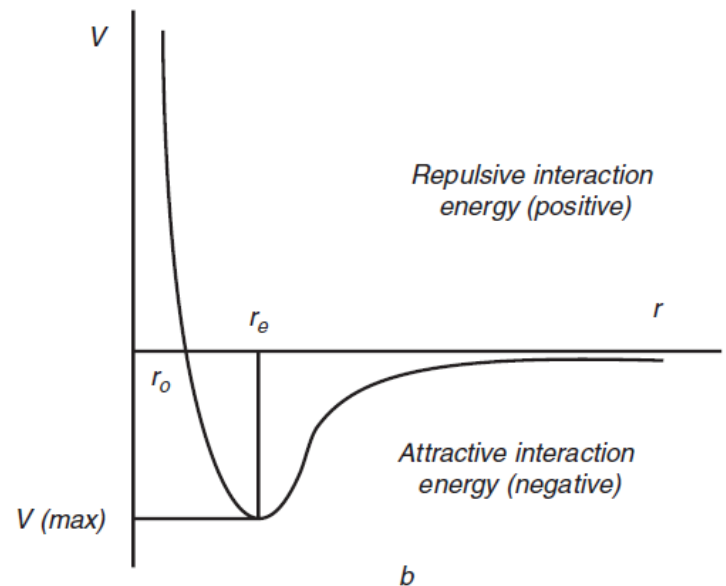
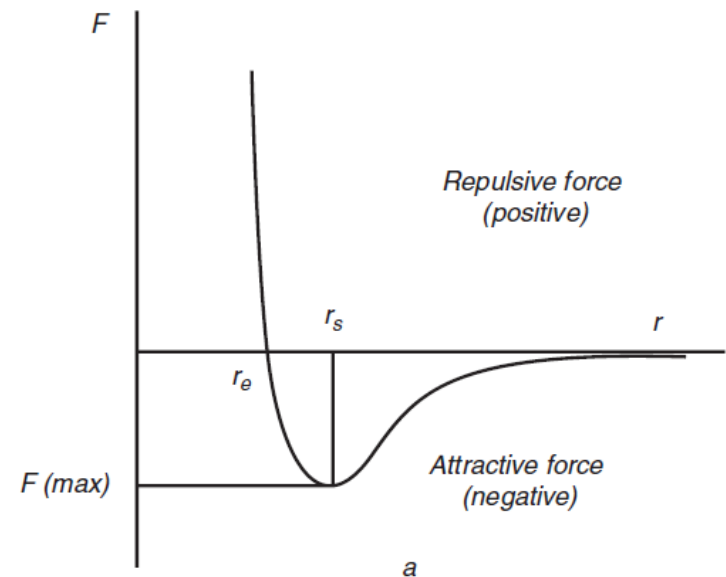
Interakciu môžeme popísať pomocou sily F , alebo potenciálu V ($F = -\text{grad } V$) vid'. obrázok. Všimnite si, že $V = \text{max}$ odpovedá $F = 0$.

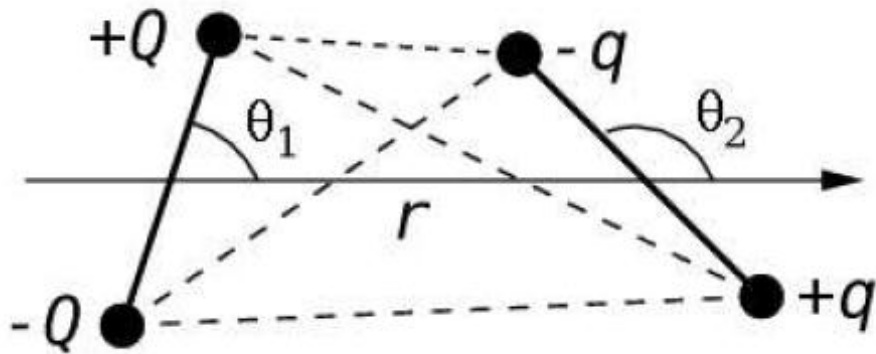
V **molekulárnej fyzike** tvoria *van der Waalsove* sily tieto interakcie:

Keesomova – priestorovo ustrednená dipól-dipólová interakcia

Debyeova – priest. ustred. dipól-indukovaný dipól interakcia

Londonova disperzná – kvantový jav, polarizácia vyvolaná pohybom (hoci veľmi rýchlym 10^{16} s^{-1}) valenčných elektrónov.





Ustrednené cez θ :

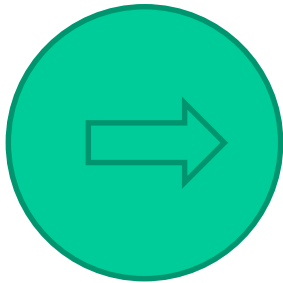
Príťažlivá interakcia

$$U_{\text{Keesom}} = - \frac{u_1^2 u_2^2}{3(4\pi\epsilon_0\epsilon_r)^2 k_B T r^6},$$

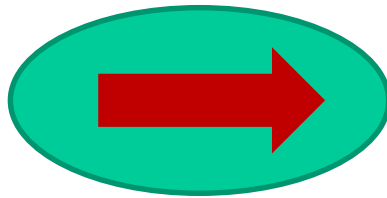
$u_{1,2}$ – dipólový moment

α – polarizovateľnosť

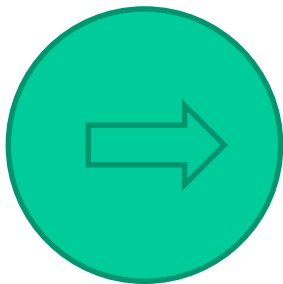
$$U_{\text{Debye}} = - \frac{u_1^2 \alpha_2}{(4\pi\epsilon_0\epsilon_r)^2 r^6}.$$



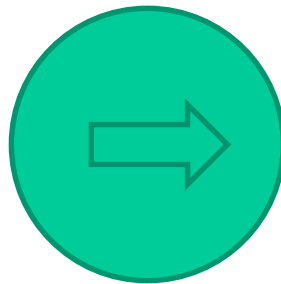
Indukovaný dipól



Perm dipól



Indukovaný dipól



Indukovaný dipól

Potenciál dipólu

$$U_{\text{London}} \propto - \frac{\alpha_1 \alpha_2}{r^6}$$

Závislosť vždy $\approx 1/r^6$

$(1/r^3)^2$

Ustrednenie
cez rôzne orientácie

Priebeh interakčného potenciálu molekúl je možné fitovať **Mie-ho potenciálom**:

odpudivá
interakcia

$$V = \frac{C_n}{r^n} - \frac{C_m}{r^m}$$

príťažlivá interakcia

Iba ak $n > m$ priebeh bude mať V minimum.

Obľúbený **Lennard-Jonesov potenciál** je špeciálny prípad pre $n=12$ a $m=6$ (vid'. van der Waals) :

$$V = 4\epsilon \left\{ \left(\frac{r_0}{r} \right)^{12} - \left(\frac{r_0}{r} \right)^6 \right\}$$

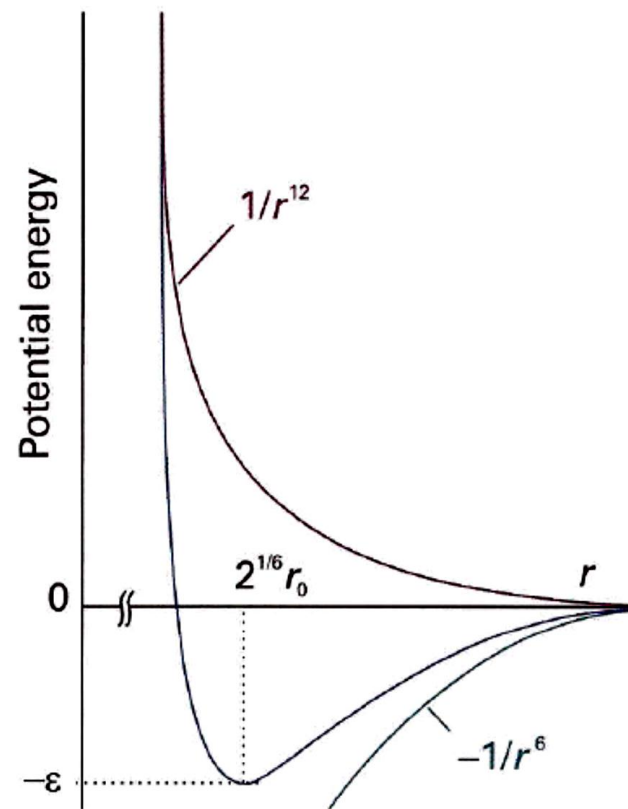
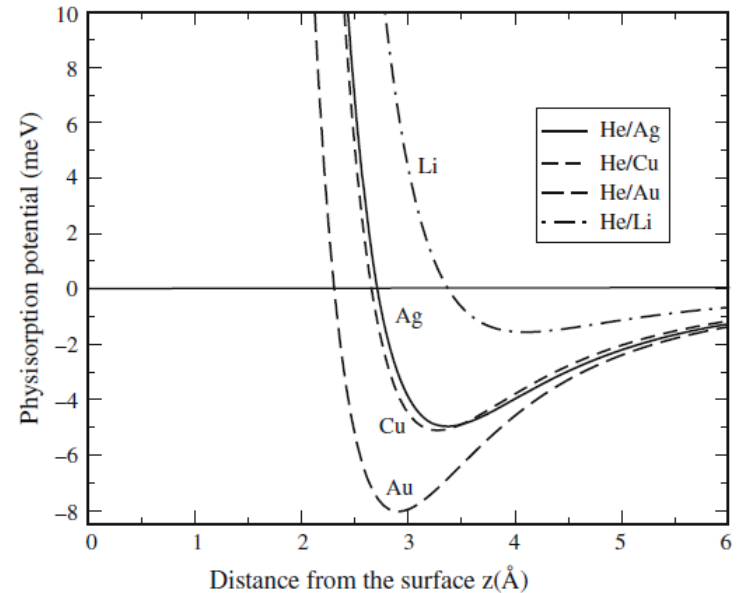
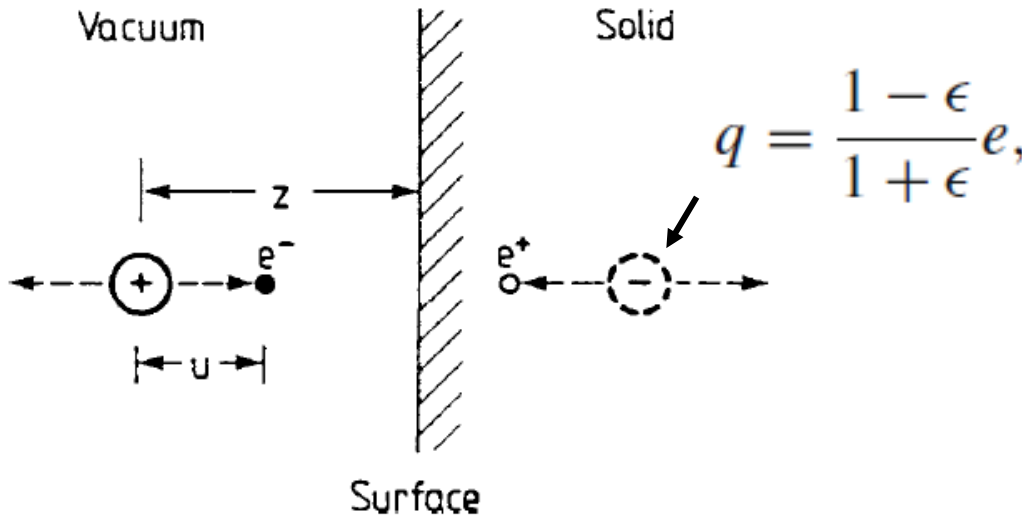


Fig. 18.11 The Lennard-Jones potential, and the relation of the parameters to the features of the curve. The green and purple lines are the two contributions.

Interakcia atómu s povrchom

Aj interakcie atómov s povrchom sú sprostredkované elektrickými silami.

Približujme **neutrálny** a **nepolárny** atóm k zovšeobecnenému povrchu. Reakcia atómov povrchu na oscilácie valenčného e tohto atómu je možno popísať pomocou triku so zrkadlovým nábojom q (pre kov $\epsilon \rightarrow \infty$).



$$V(z) = -\frac{\tilde{q}^2}{2z} - \frac{\tilde{q}^2}{2(z-u)} + \frac{\tilde{q}^2}{(2z-u)} + \frac{\tilde{q}^2}{(2z-u)} \simeq -\frac{\tilde{q}^2 u^2}{4z^3}.$$

Závislosť $1/r^3$

Platí, že atóm cíti príťažlivú silu povrchu z väčšej diaľky než pri molekul. interakciách.

Fyzikálna adsorpcia

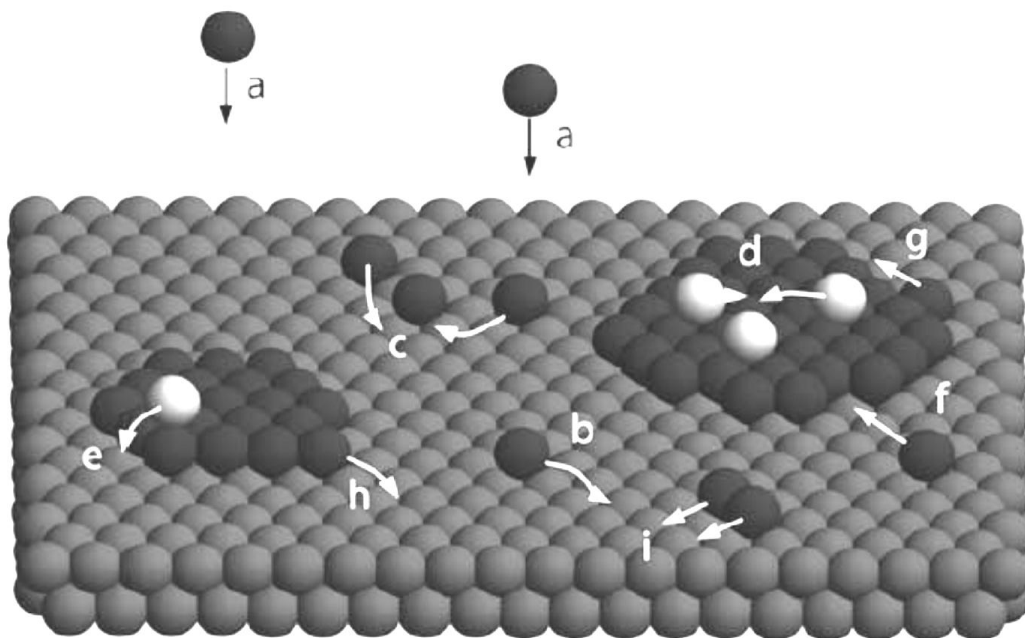
Fyziisorpcia: proces pri ktorom sa elektrónový obal častice a povrchu takmer nezmení.

- Častica je v relatívne veľkej vzdialenosti od povrchu (3Å)
- Väzobná energia je relatívna malá (0,1 eV), $\Delta H_{\text{ads}} = -10$ to -40 kJ.mol^{-1} ,
- Adsorbované častice zvyčajne nie sú lokalizované. Môžu pohybovať, prípadne otáčať

(*Chemisorpcia*: proces, pri ktorom dochádza k vytvoreniu nových „hybridných“ orbitálov medzi časticou a povrchom, $\Delta H_{\text{ads}} > 40 \text{ kJ.mol}^{-1}$)

Kinetické procesy na povrchu:

- (a) Depozícia
 - (b) Difúzia po terase
 - (c) Vznik ostrova (nukleácia)
 - (d) Nukleácia ostrova na 2. vrstve
 - (e) Difúzia na nižšiu terasu
 - (f) Záchyt na ostrov
 - (g) Difúzia pozdĺž schodu
 - (h) Odtrhnutie od ostrova
 - (i) Difúzia diméru alebo ostrova
- Desorpcia



Adsorpčné izotermy

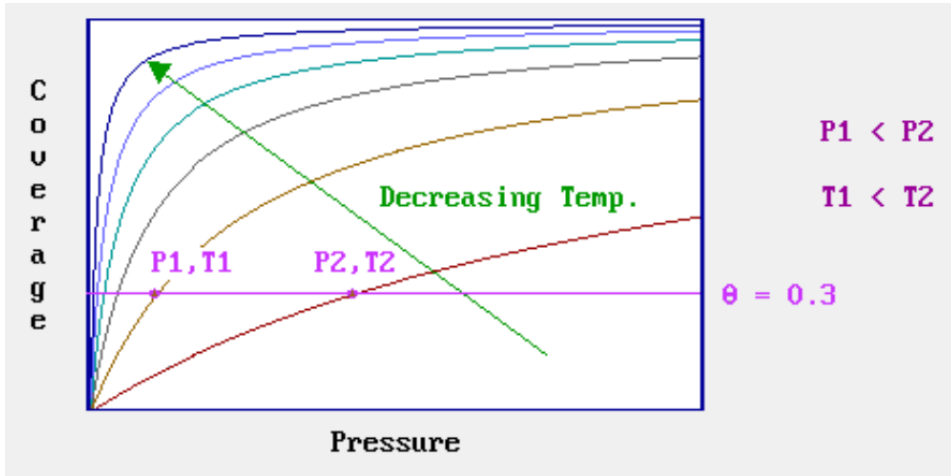
Voľný a adsorbovaný plyn sú v dynamickej rovnováhe (lebo z Maxwell-Boltzman $e^{-0,1\text{eV}/300\text{K}} = \text{cca } 5\%$ plynu má väčšiu energiu). Závislosť relatívneho pokrytia θ (=počet adsorbovaných častíc / počet miest dostupných pre adsoprciu) tlaku, pri danej teplote sa nazýva adsorpčná izoterma.

Langmuirova: premisy: (1) iba monovrstva, (2)všetky miesta povrchu sú si rovné, (3) adsopcia nezávislá od adsorbovaných susedov.

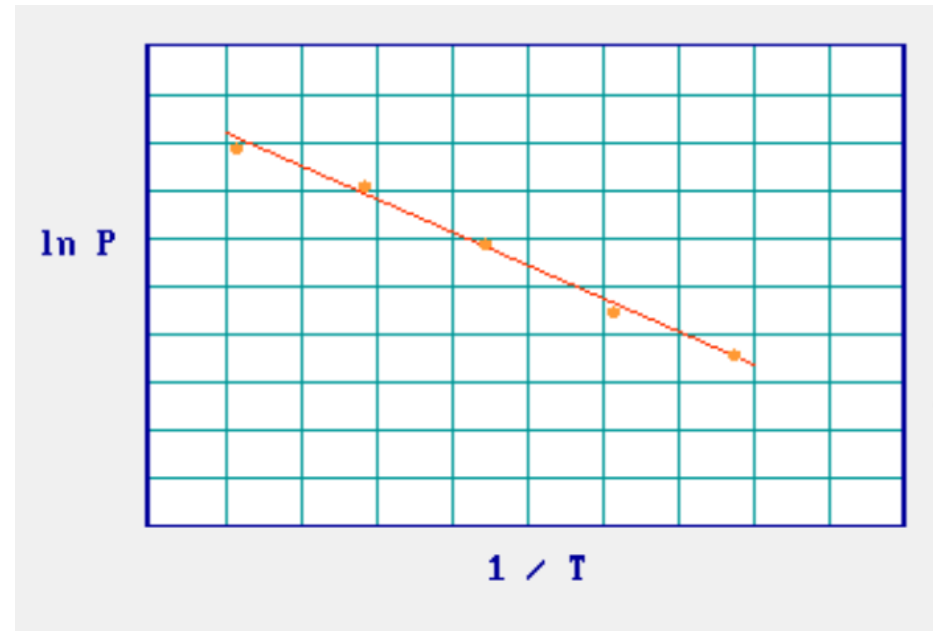
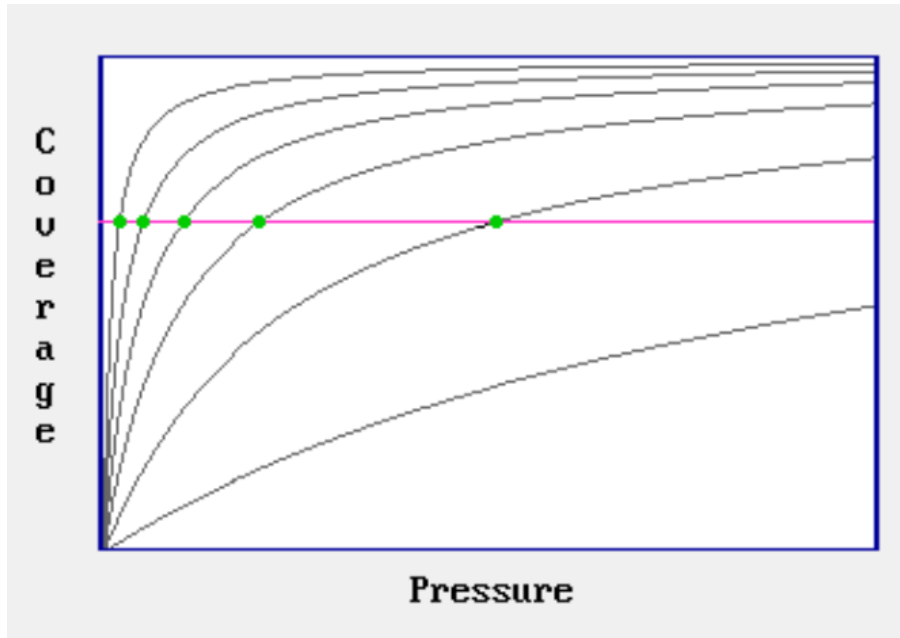
$$\frac{d\theta}{dt} = -k_d(N\theta)^2$$

$$\frac{d\theta}{dt} = k_a p \{N(1 - \theta)\}^2$$

$$\theta = \frac{Kp}{1 + Kp} \quad K = \frac{k_a}{k_d}$$



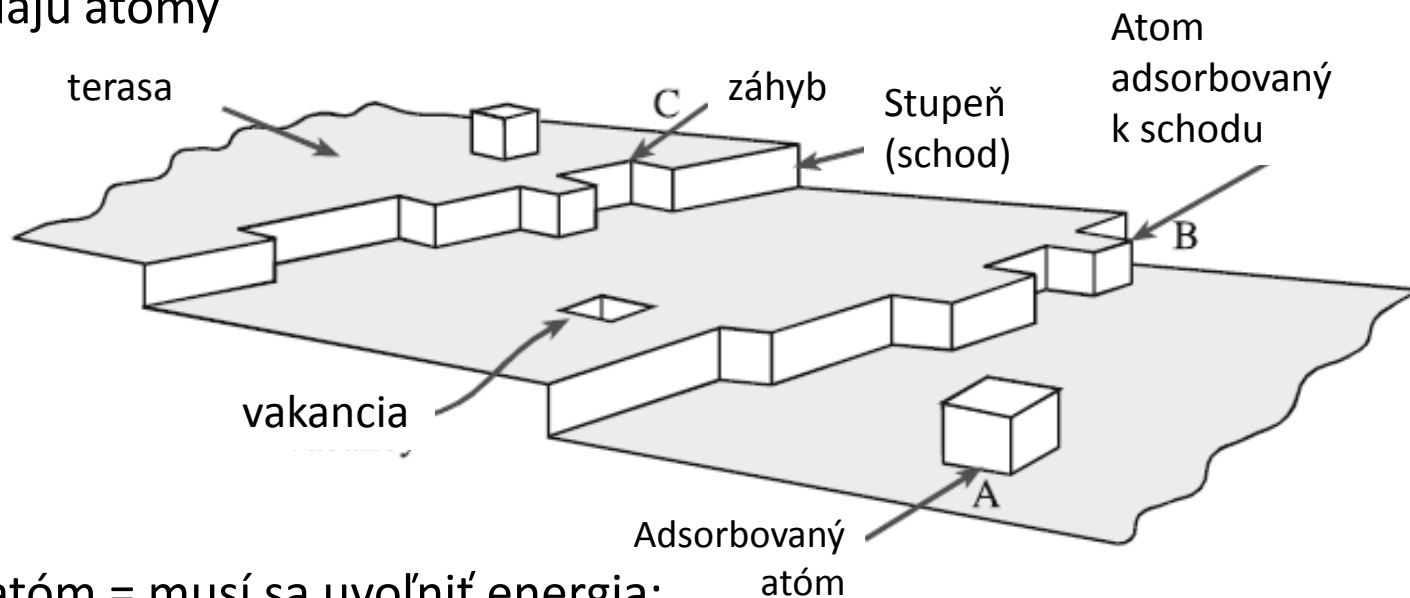
Určenie adsorpčnej entalpie H_{ads}



$$\left(\frac{\partial \ln P}{\partial 1/T} \right)_{\text{const } \theta} = \frac{\Delta H_{ads}}{R}$$

Iné izotermy – BET, Freundlichova atď.

Reálna štruktúra povrchu,
na ktorú dopadajú atómy



Adsorbovaný atóm = musí sa uvoľniť energia:

E_1 = energia uvoľnená od najbližšieho suseda

E_2 = energia uvoľnená od druhého najbližšieho suseda

Poloha	Získ energie
A	$E_1 + 4E_2$
B	$2E_1 + 6E_2$
C	$3E_1 + 6E_2$

Termodynamika zvyhodňuje polohu C
pred B a A.

Rast filmu

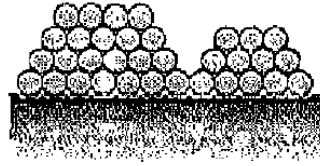
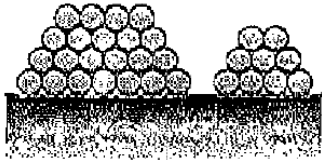
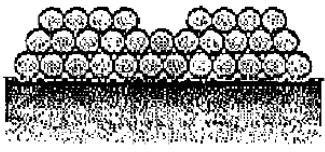
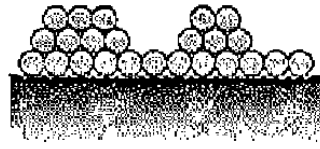
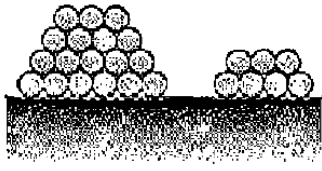
Frank-van der Merwe



Volmer-Weber



Stranski-Krastanov



Vrstevný rúst
*Adsorpcia
preferenčne na
substát*

Ostrúvkový
rúst
*Adsorpcia
preferenčne
navzájom*

Kombinovaný,
Rúst vrstvy (1-2
monovrstvy) s
ostrúvky



Reaktívny (napr.
pri vysokej
teplote)

Voľné väzby (*dangling hybrids*) vytvorené rezom

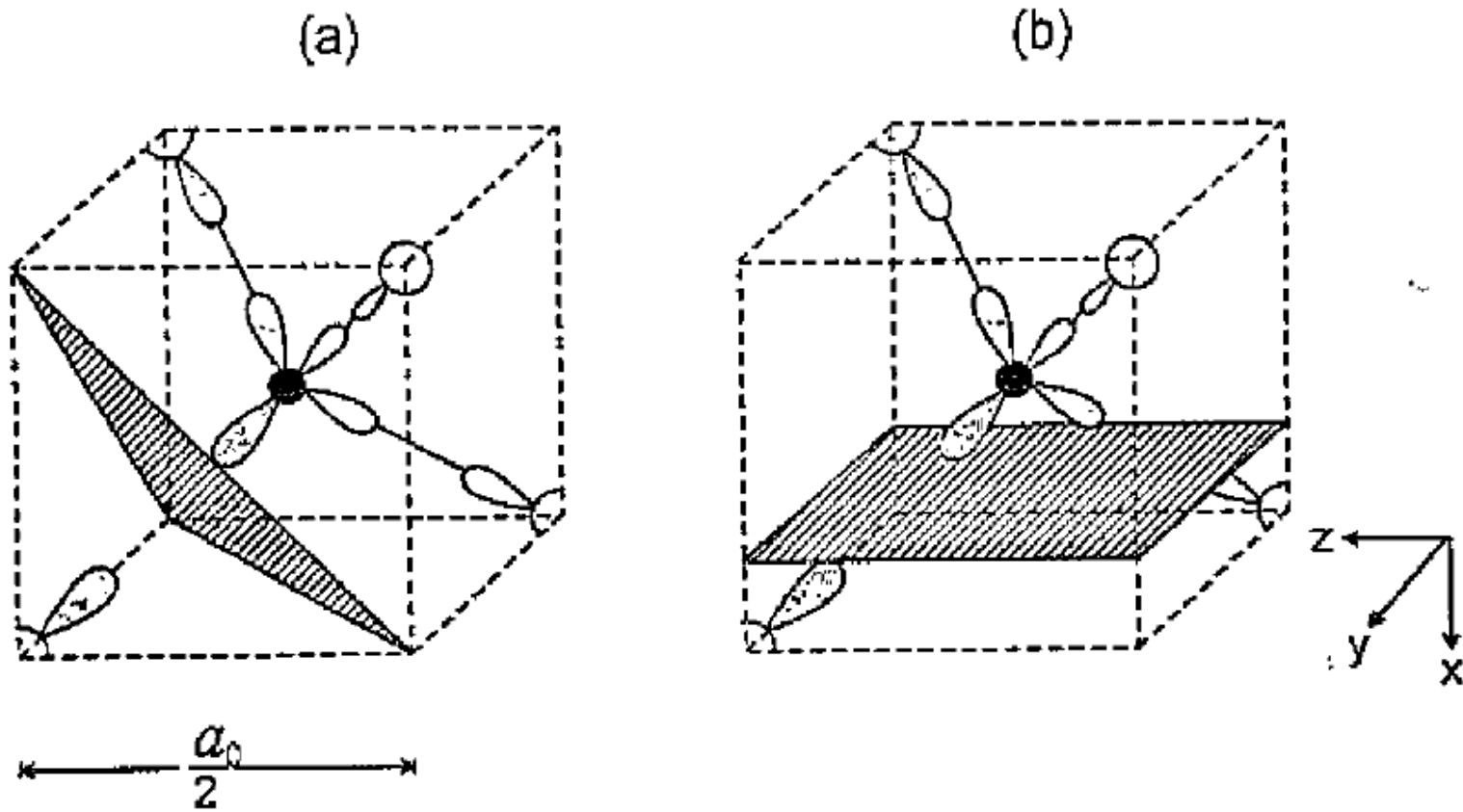


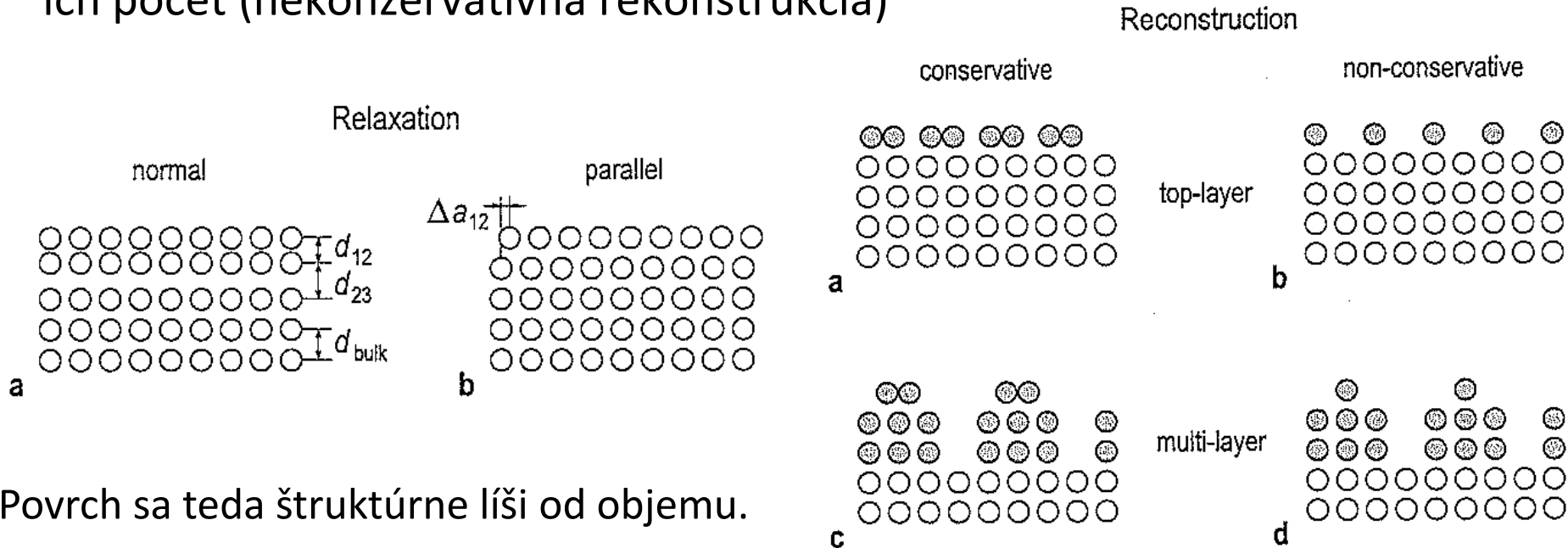
Fig. 3.8. Illustration of bond cutting during surface formation. sp^3 hybrids in the four bonds surrounding an atom in a diamond- or zinc-blende-structure crystal are shown: (a) (111) surface; (b) (100) surface. The surface planes are hatched within the little cubes.

Špecifické vlastnosti plôch

Vytvorme povrch tak, že rozrežeme kryštál pozdĺž niektorej kryštalografickej roviny. Tým že zmiznú objemoví atomárni susedia, musia povrchové atómy zaujať nový rovnovážny stav pomocou **relaxácie**, alebo **rekonštrukcie**.

Relaxácia – atomárna štruktúra zostane zachovaná, zmení sa však medzivrstvová vzdialenosť.

Rekonštrukcia – zmení sa rozostavenie povrchových atómov, niekedy aj ich počet (nekonzervatívna rekonštrukcia)



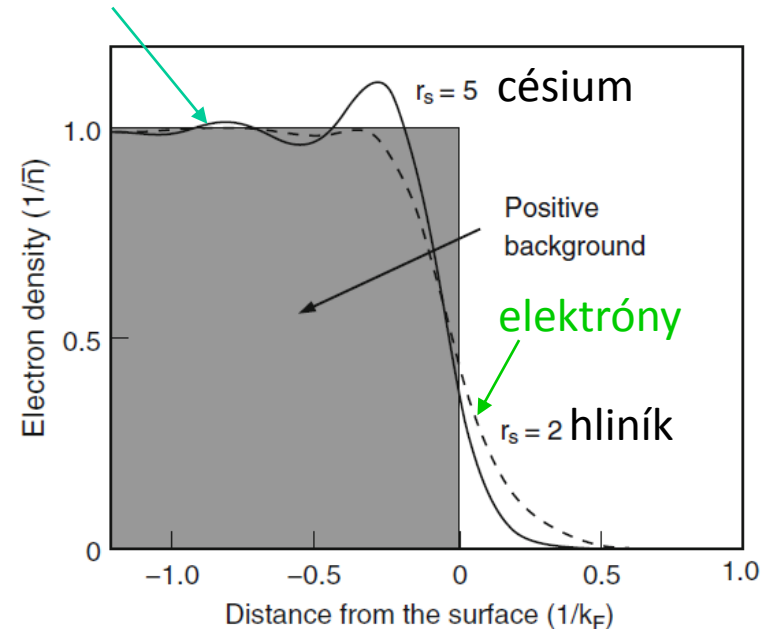
Odpudivé sily

Súvisia s prekryvom elektrónových orbitálov. Ako vyzerajú elektrónové orbitály nad povrchom substrátu?

Elementárnu predstavu nám dá tzv. *jellium* model (izotropne kontinuum). Lokalizované kladné náboje mriežky sú nahradené homogénnym kladným nábojom.

Friedelove oscilácie (vlny)

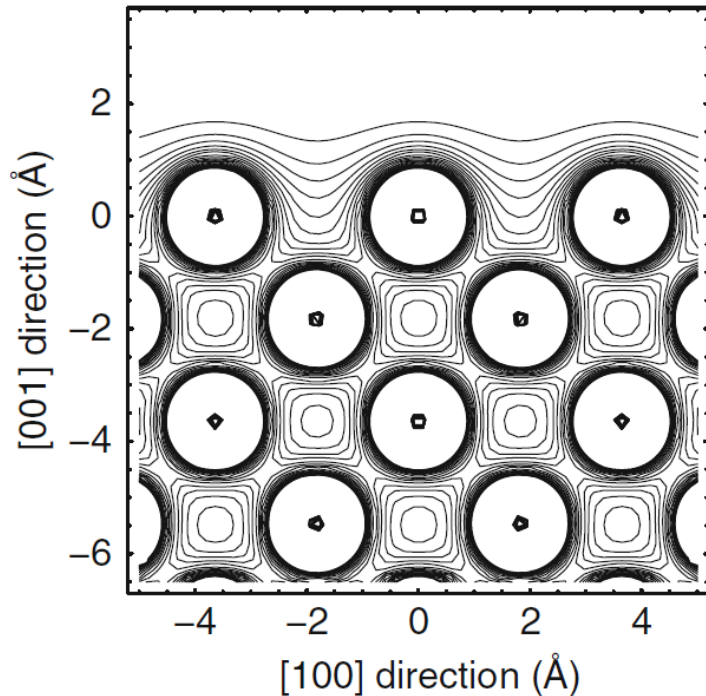
$$n_+(\mathbf{r}) = \begin{cases} \bar{n}, & z \leq 0 \\ 0, & z > 0 \end{cases} .$$



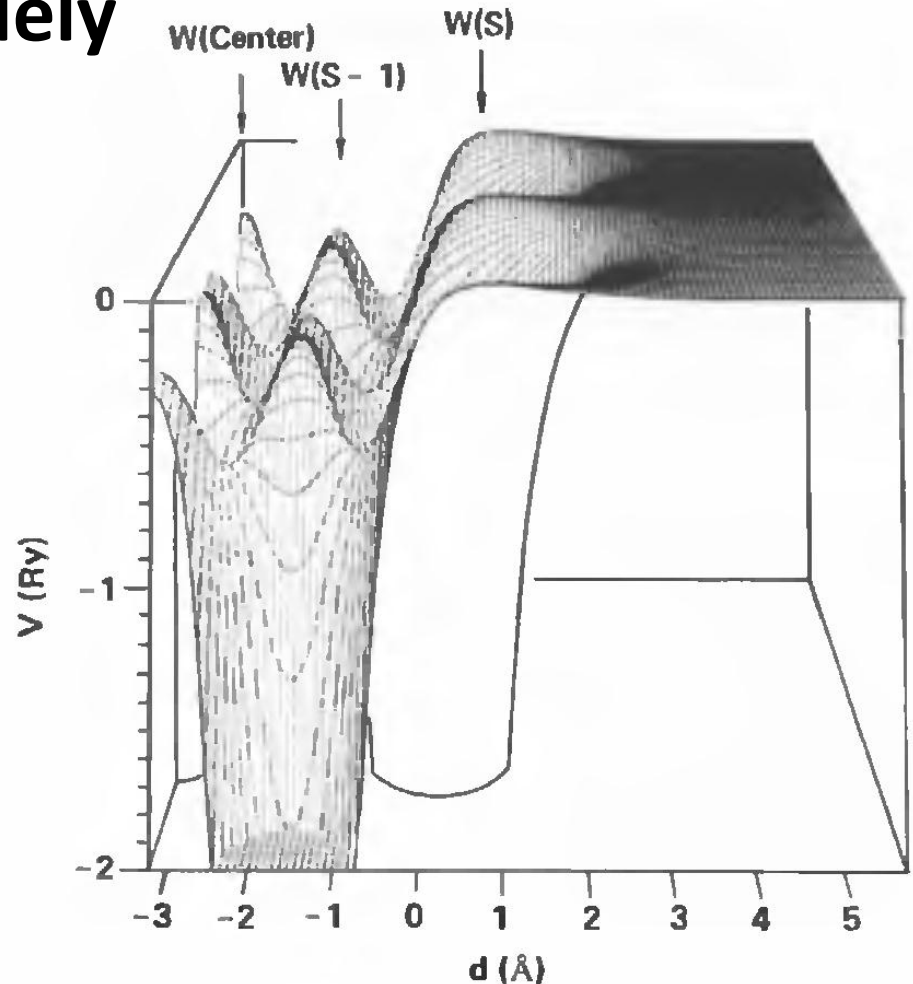
N. D. Lang, W. Kohn: Phys. Rev. B 1 (1970) 4555.

Smoluchowski effect – ostré schody sa javia ako dipól

Novšie numerické modely



DFT výpočet elektrónovej hustota povrchu Cu(001) v reze (010) ukazuje vyhladenie rozloženia povrchových elektrónov.



Elektrostatický potenciál roviny (110) orientovanej kolmo na povrch čistého W (001)

DFT – Density functional theory = Teorie funkcionálu hustoty

Viazané povrchové stavy elektrónov

Kvantovanie elektrického poľa medzi časticou a jej zrkadlovým nábojom vedie k vzniku povrchových viazaných stavov.

$$\frac{d^2}{dz^2}\psi(z) + V(z) = \varepsilon\psi(z).$$

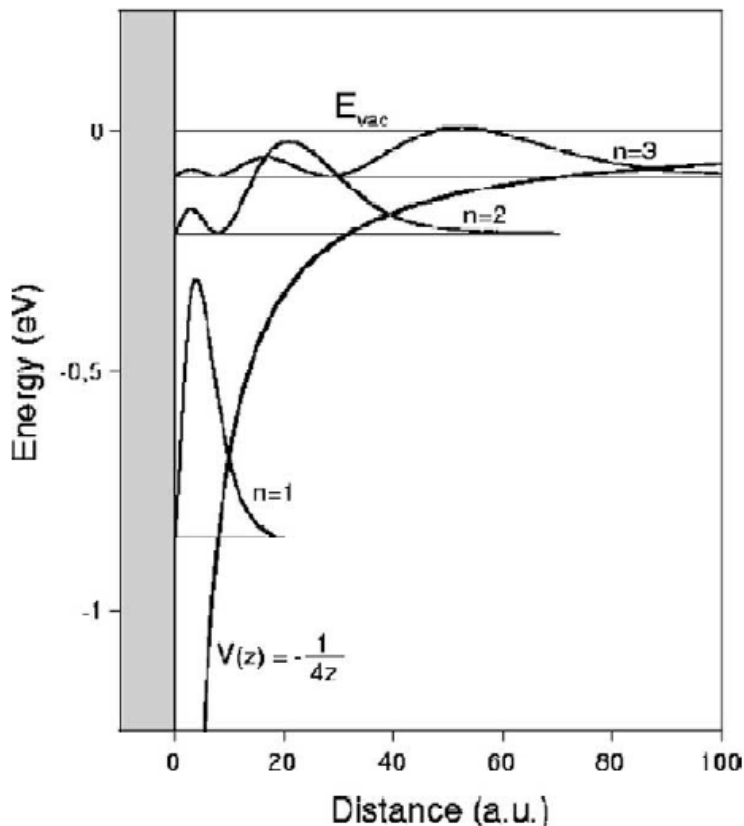
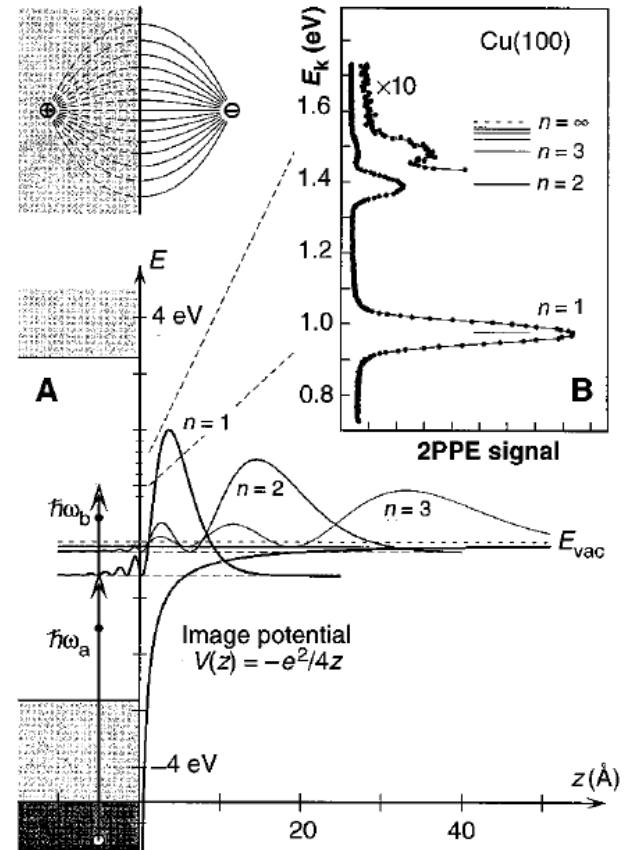


Fig. 1. Image potential and first image states of a Rydberg series plotted together with the infinite crystal barrier.



Time-Resolved Coherent Photoelectron Spectroscopy of Quantized Electronic States on Metal Surfaces

U. Höfer *et al.*

Science **277**, 1480 (1997);

DOI: 10.1126/science.277.5331.1480

Atomárna chemisorpcia

Vznik skutočnej chemickej väzby medzi substrátom a časticou

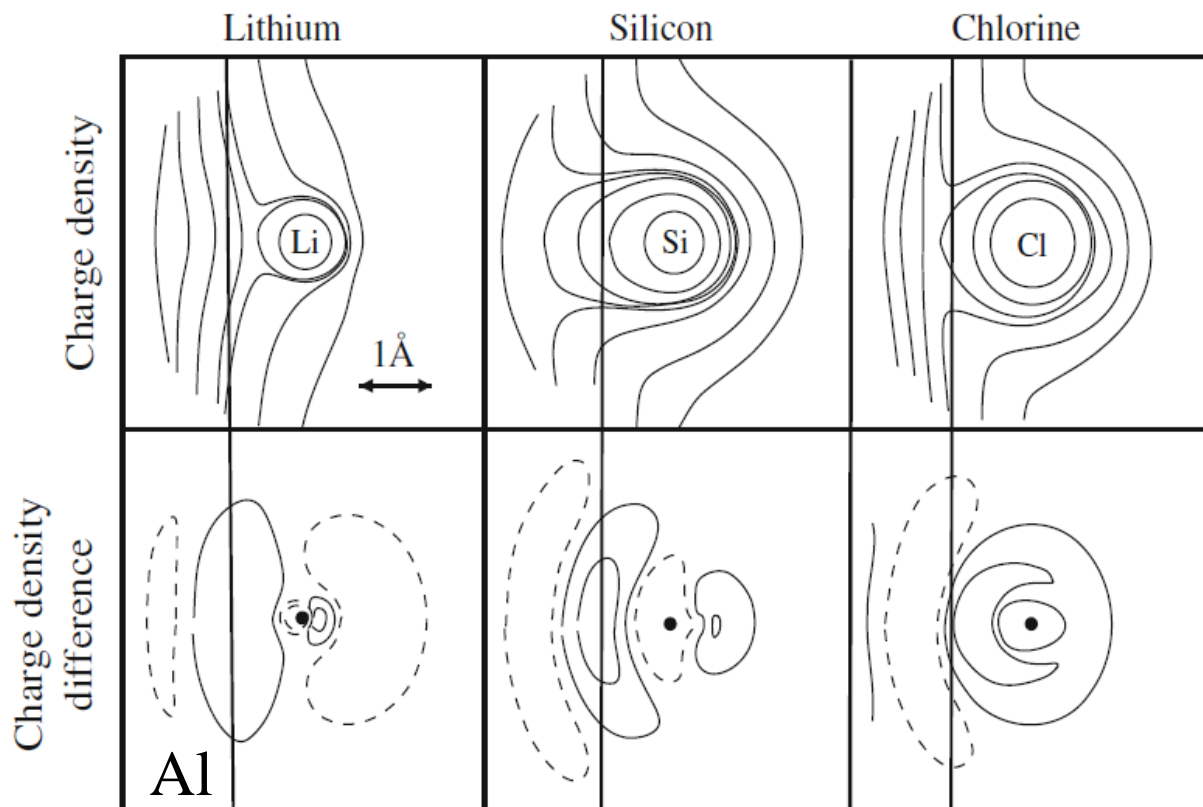


Fig. 5.7. Contours of constant charge density calculated using DFT for Li, Si and Cl adsorbed on a high-density jellium substrate. The solid vertical line indicates the jellium edge. Upper panel: Total charge density of states; lower panel: charge density difference, broken lines correspond to charge depletion. (After [168])

Termodynamika chemisorpcie

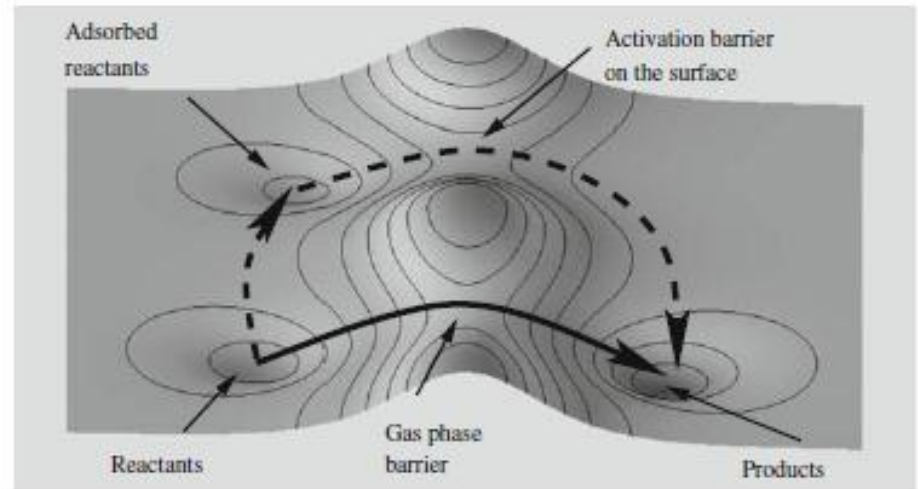
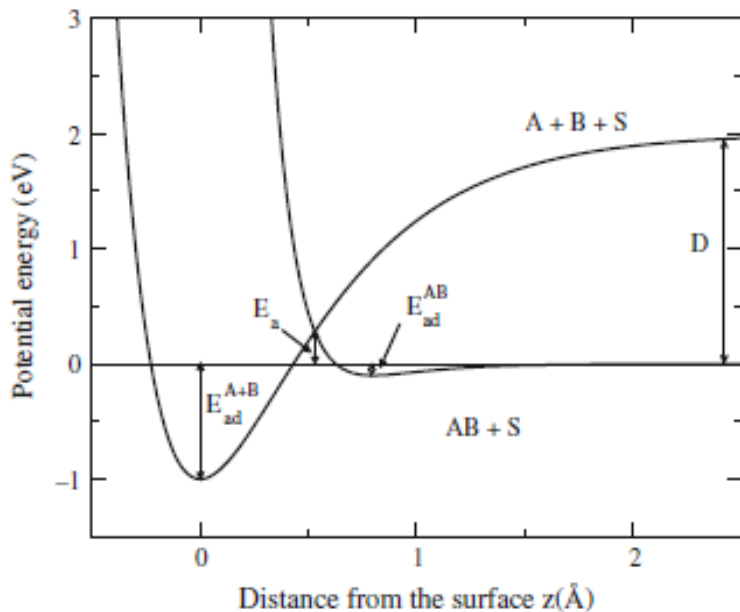
Pre spontánny proces musí byť $\Delta G = \Delta H - T\Delta S < 0$

Pretože adsorpciou sa zníži stupeň voľnosti je $\Delta S < 0$.

Preto musí byť proces exotermický, $\Delta H < 0$.

Výnimku predstavuje prípad, keď adsorbát disociuje, vtedy nárast entropie môže kompenzovať endotermickú ΔH .

Molekulána disociácia na povrchoch sa uplatňuje v heterogénnej katalýze:



Dvojmerný *potential energy surface* PES – umožňuje meniť E_a

Reálne povrchy

Dokonalý povrch je možné očakávať v zásade iba počas jeho výroby (napr. MBE). V reálnejšej situácii sú povrchy zoxidované, s adsorbovanou vodou:

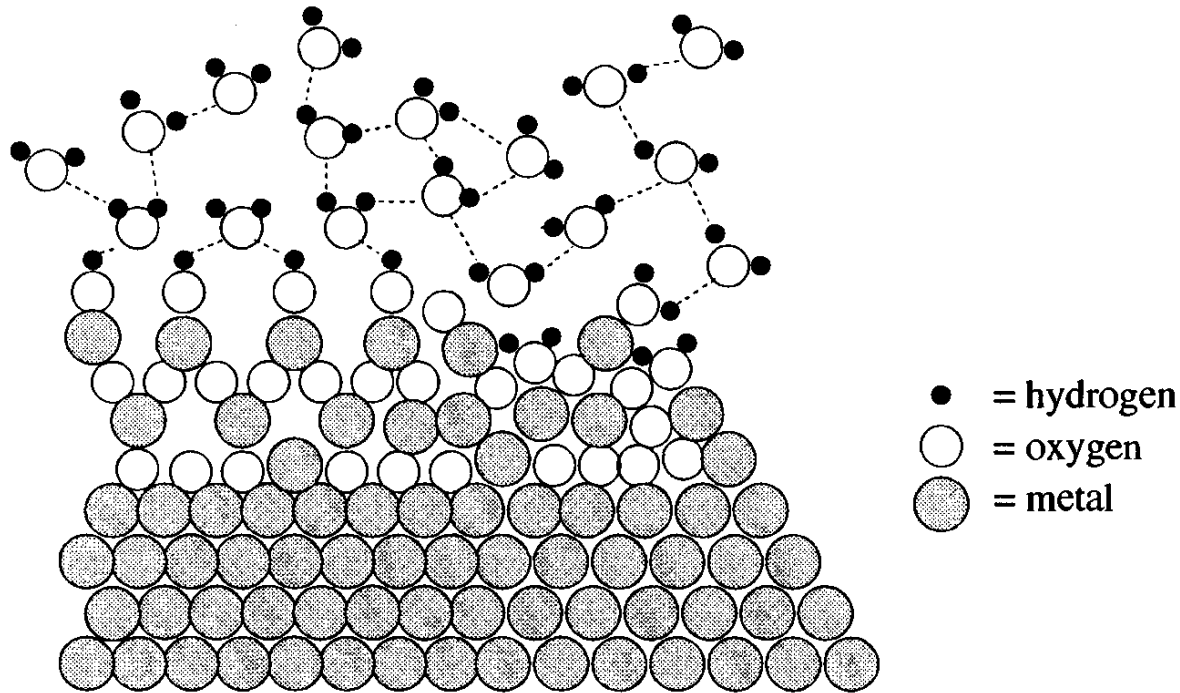


Fig. 6.2. Representation of a metallic surface in contact with an oxidizing and humid atmosphere. Point lines between oxygens and hydrogens in the hydroxylation layer indicate hydrogen bonds.

Hydroxylová skupina OH

Voda na oxidovaných povrchoch disociuje, čím vzniká OH^- a H^+ , ktoré obsadia povrch (OH^- kationy, a H^+ anióny) (viď. obrázok). Adsorpčná energia závisí od druhu materiálu.

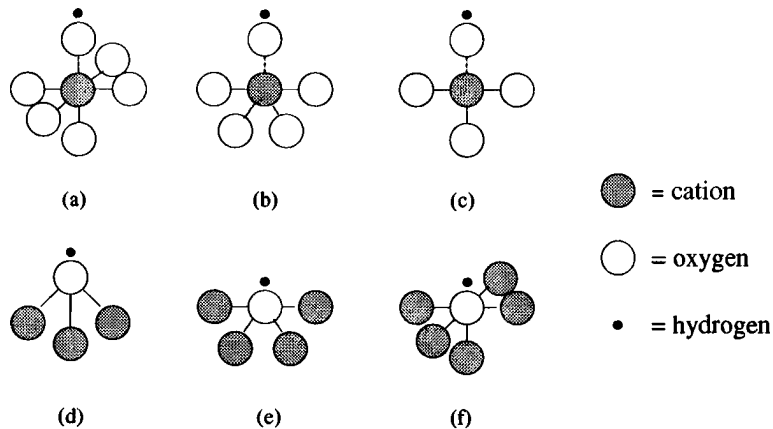


Fig. 6.5. Configurations of OH^- groups on oxide surfaces: (a), (b), (c) the hydroxyl group is adsorbed on a five-, four- and three-fold coordinated surface cation, respectively; (d), (e), (f) the proton is adsorbed on a three-, four- and five-fold coordinated surface oxygen, respectively.

Table 6.3. Adsorption energies (in eV) of protons and hydroxyl groups on various oxide surfaces.

	BaO (100)	SrO (100)	CaO (100)	MgO (110)	TiO ₂ (0001)	SiO ₂
$E_{\text{H}^+}^{\text{ads}}$	10.7	10.1	9.3	8.3	5.9	4.8
$E_{\text{OH}^-}^{\text{ads}}$	0.4	0.0	0.3	1.0	8.3	10.3
$E_{\text{tot}}^{\text{ads}}$	11.1	10.1	9.61	9.3	14.2	15.1
E^{ads}	12.7	12.2	12.1	12.3	16.6	21.0

* $E_{\text{H}^+}^{\text{ads}}$ and $E_{\text{OH}^-}^{\text{ads}}$, respectively, are the proton and hydroxyl-group adsorption energies in the limit of zero coverage. $E_{\text{tot}}^{\text{ads}}$ is their sum and E^{ads} the adsorption energy per dissociated water molecule in the limit of saturation of the surface.

Iónové bombardovanie

V prípade plazmy alebo iónových zväzkov, je energia častíc podstatne väčšia. Výsledkom dopadu takýchto energetických častíc je vznik defektov, odprašovanie vrchných vrstiev a zmena zloženia pri preferenčnom odprašovaní, ion-beam mixing (atómy mriežky obsadia uvoľnené miesto), bombardovaním indukovaný rozklad, radiačne zosilnená difúzia, fázové prechody atď.

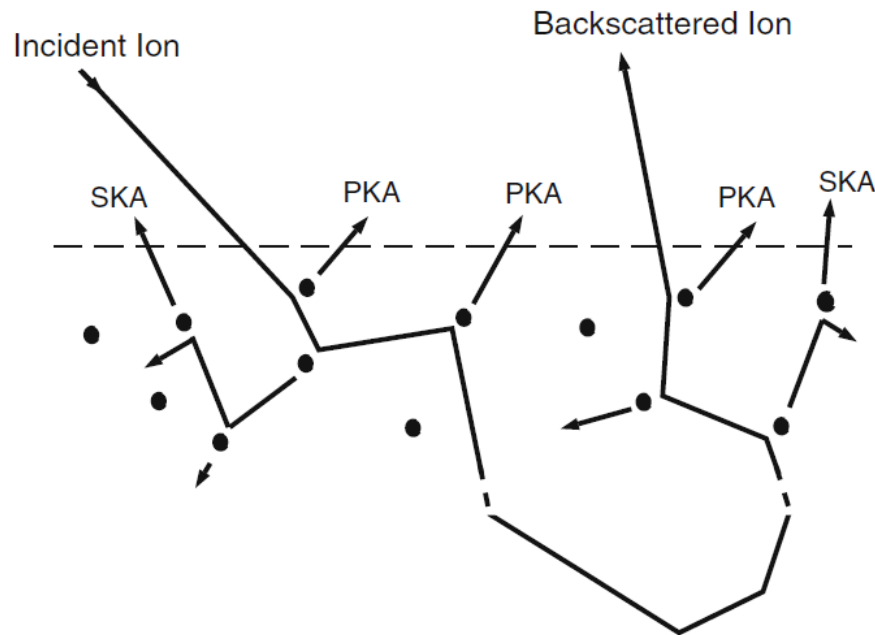


Fig. 6.11. Sputtering mechanisms for low-energy light ions. PKA: primary knock-on atom; SKA: secondary knock-on atom (see Fig. 12.1 of [109])

Literatúra

Carter C. Barry, Norton M. Grant: *Ceramic materials/Science and Engineering*, Springer 2007

Atkins P, De Paula J: *Atkins' Physical Chemistry*, 8th Edition, Oxford University Press, 2006

Axel Groß: *Theoretical Surface Science: A Microscopic Perspective*, 2009 Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Claudine Noguera: *Physics and Chemistry at oxide surfaces*, 1996 Cambridge University Press

Friedhelm Bechstedt: *Principles of Surface Physics*, 2003 Springer-Verlag Berlin Heidelberg.