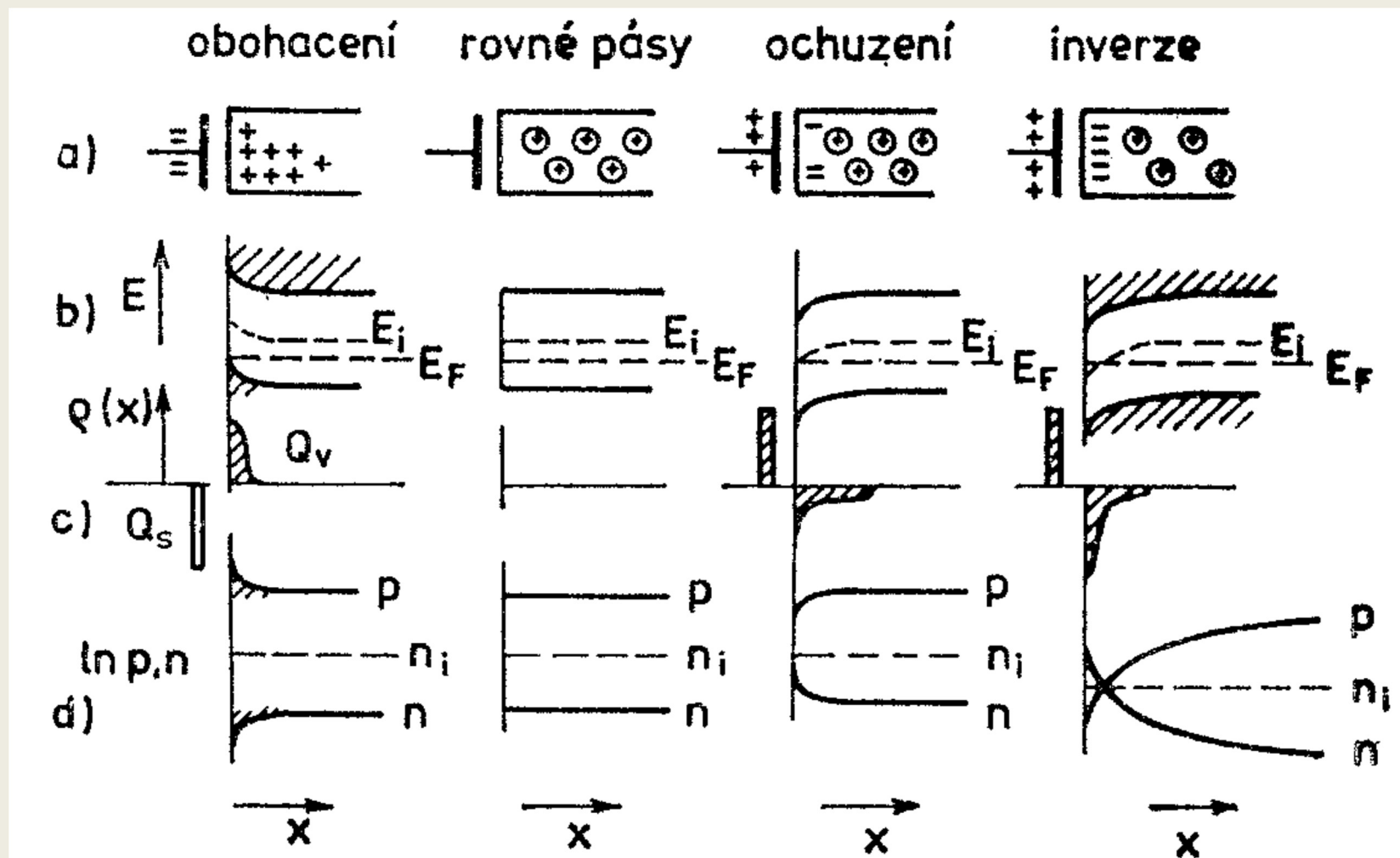


Vliv vnějšího elektrického pole

- Je známo, že povrchové stavy vedou k ohnutí energetických pásů u polovodičů (u kovů elektrické pole do povrchu neproniká díky velkému množství vodivostních elektronů).
- Povrchové stavy nesou náboj -> kompenzace náboje z objemu -> vznik vnitřního elektrického pole -> ohyb pásu.
- Takové ohnutí pásů lze vyvolat i vnějším elektrickým pole.
- Mějme polovodič typu P a na vnější elektrodu dáme různá napětí -> ovlivníme pásovou strukturu u povrchu polovodiče.

Vliv vnějšího elektrického pole



Vliv vnějšího elektrického pole

- Vnější elektrické pole může ovlivnit efektivní výstupní práci materiálu.
- χ je stále stejné, ale díky ohnutí pásu se mi sníží nebo zvýší potenciálová bariéra pro elektrony.
- Tento jev se uplatňuje u všech látek, i kovů – **Schottkyho efekt**.
- Práce potřebná pro emisi elektronu z látky je:

$$\chi = \chi_0 - \Delta\chi,$$

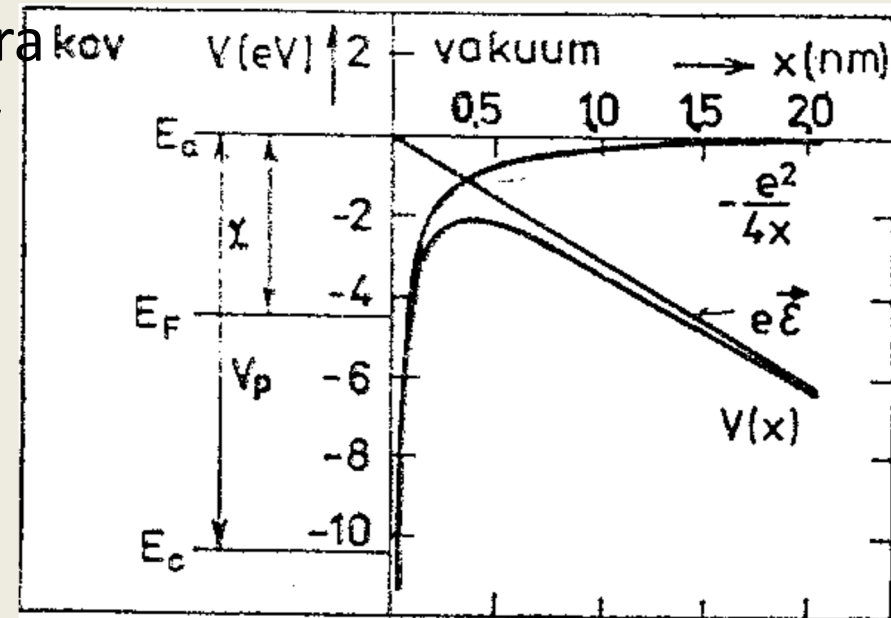
kde χ_0 je výstupní práce za nepřítomnosti vnějšího el. pole a $\Delta\chi$ je práce vykonaná (spotřebovaná) vnějším elektrickým polem E .

$$\Delta\chi = \left(\frac{e^3 \mathcal{E}}{4\pi\epsilon_0} \right)^{1/2}$$

$$\Delta\chi = 3,8 \cdot 10^{-5} \sqrt{\mathcal{E}}$$

Vliv vnějšího elektrického pole

- Tedy pro vnější el. pole řádu 10^{10} V m^{-1} by měla být výstupní práce nulová a elektrony vycházet z povrchu volně!!!
- Neplatí to už při malých velikostech pole, kdy se uplatňují kvantově-mechanické jevy.
- Vnější el. pole ohne potenciál do bariéry.
- Čím silnější pole, tím užší bariéra
-> pro 10^9 V m^{-1} je šířka bariéry srovnatelná s vlnovou délkou elektronů na Fermiho hladině
-> existuje pravděpodobnost, že elektron bariéru překoná tunelovým jevem.



Vliv vnějšího elektrického pole

- Tedy k emisi elektronů dojde i pro relativně malá vnější el. pole.
- Intenzita el. emise je větší, než plynoucí ze Schottkyho efektu.
- **Tunelová emise** je téměř nezávislá na teplotě povrchu.
- Není třeba elektronům dodávat energii -> nepřekonávají potenciálovou bariéru, ale procházejí skrze ní.
- Teorie tunelové emise patří k základním úlohám kvantové mechaniky.
- Teorii poprvé vypracovali Fowler a Nordheim.
- Při odvození hustoty emitovaného tunelového proudu se vychází ze Sommerfeldova modelu kovu s dokonale hladkým a rovinným povrchem.

Vliv vnějšího elektrického pole

$$j = e \int_{W_D}^{\infty} N(W) D(W) dW$$

- zde $N(W) dW$ je tok elektronů dopadajících na povrch a $D(W)$ je pravděpodobnost tunelové emise pro elektron s kin. energií W .
- $D(W)$ je úměrné poměru druhých mocnin vlnových funkcí elektronu na obou stranách bariéry.
- V případě Coulombovského potenciálu lze $D(W)$ napsat jako:

$$D(W) = f(W, V) \exp \left[-2 \left(\frac{2m}{h^2} \right)^{1/2} \int_0^l (V - W)^{1/2} dx \right]$$

- Pro hustotu proudu nakonec získáme
kde faktory B a C
a slabě závisí na $j = B \mathcal{E}^2 \exp \left[-C \frac{\chi^{3/2}}{\mathcal{E}} \right]$ odpovídají materiálu
el. poli.

Vliv vnějšího elektrického pole

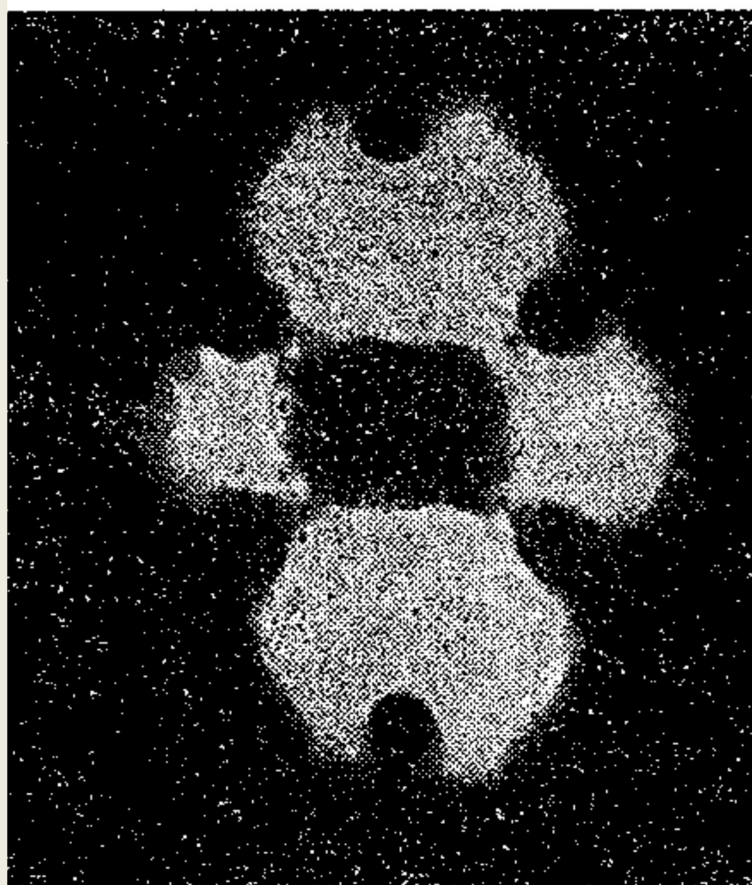
- Energetická distribuce emitovaných elektronů je silně ovlivněna velikostí vnějšího el. pole a teplotou materiálu.
- Pro vysokou teplotu se mi prudce zvýší počet tunelově emitovaných elektronů s vyšší energií – pravděpodobnost emise se zvýší.
- Nejjednodušeji se tunelová emise pozoruje u kovů (není zde ohyb pásů a pole neproniká do látky).
- Nicméně i u polovodičů lze tunelovou emisi pozorovat.
- Velkou roli zde hrají povrchové stavy – jejich obsazení se mění vnějším polem, ale zároveň odstiňují vnější pole.

Vliv vnějšího elektrického pole

- V praxi se emisní tunelový proud měří v elektronovém projektoru (autoemisní tunelový mikroskop).
- Emitovaný proud z hrotu monokrystalického materiálu se zobrazí na stínítku.
- Díky odleptanému hrotu s malým poloměrem křivosti, lze dosáhnout intenzity pole 10^9 V m^{-1} . Emisní proud pak závisí na výstupní práci.
- Výstupní práce je stejná jen z jedné krystalové plochy -> na stínítku se mi zobrazí jednotlivé krystalové roviny, jimž odpovídá různá výstupní práce.
- Mohu zkoumat povrch na atomární úrovni.
- Zvětšení projektoru M je dáno poměrem poloměru anody a poloměru hrotu. Konstanta K je mezi 1,5 a 2,0.

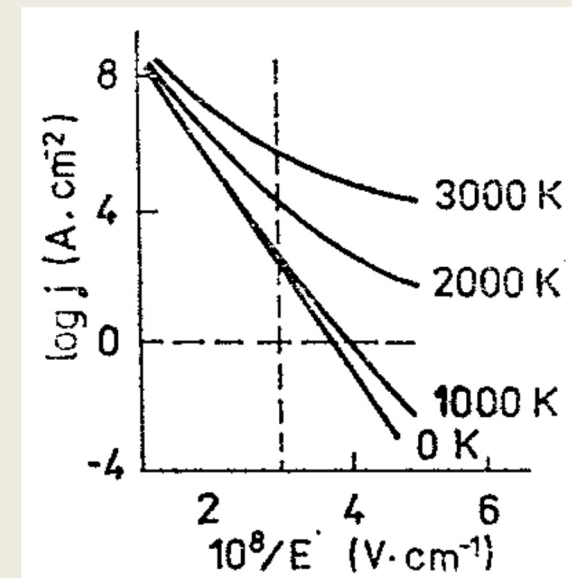
$$M = \frac{1}{K} \frac{R}{r}$$

Vliv vnějšího elektrického pole



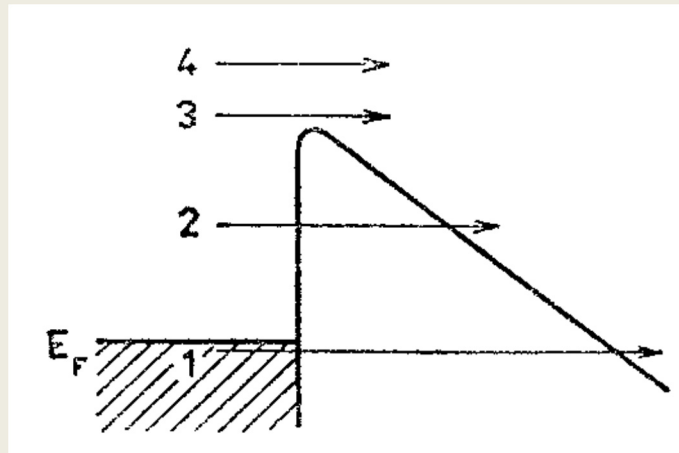
Vliv vnějšího elektrického pole

- Silná závislost emisního tunelového proudu na výstupní práci -> obraz z elektronového projektoru silně závisí na fyzikálnímu stavu povrchu.
 - Vliv adsorbovaných částic
 - Vliv mikrogeometrie
 - Vliv krystalové struktury
- Závislost emise elektronů z povrchu na přiloženém elektrickém poli je lineární jen pro nízkou teplotu. S rostoucí teplotou je závislost nelineární.



Vliv vnějšího elektrického pole

- Uplatní se zde následující mechanismy:
 - Pravá tunelová emise
 - Tunelová emise tepelně excitovaných elektronů
 - Schottkyho emise
 - Termoemise



Aplikace tunelového jevu

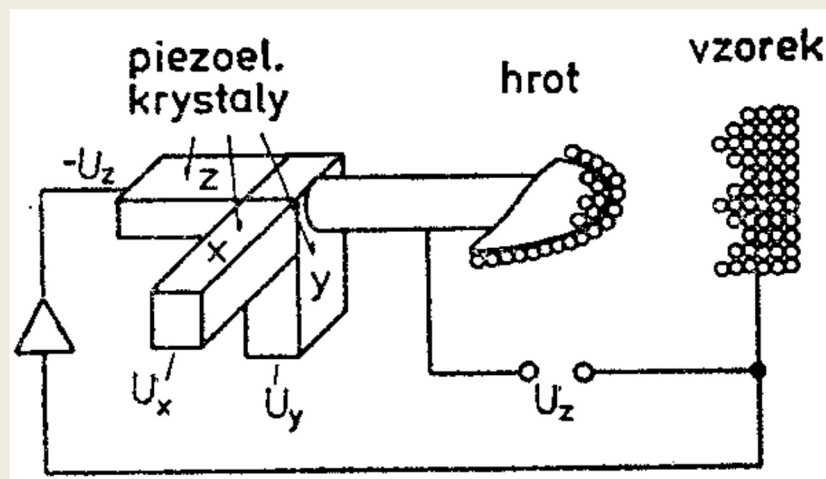
- Elektronový projektor dosahuje zvětšení 10^5 až 10^6 .
- Typicky jsme schopni dosáhnout rozlišení na hrotu 3 nm, případně vidět lokální výstupky na hrotu velikosti až 0,3 nm.
- Díky závislosti emisního proudu na výstupní práci jsme schopni sledovat:
 - adsorpční jevy
 - povrchové jevy
 - povrchovou difúzi
 - adsorpční energii krystalových rovin
 - vývoj nukleačních center
 - obrazy velkých organických molekul
- Významnou aplikací je **tunelová spektroskopie**. Tzn. Že měříme energetické spektrum emitujících elektronů.

Aplikace tunelového jevu

- Dovoluje nám to studovat rozložení hustoty stavů pod Fermiho mezí.
- Je možné usuzovat na rozložení energetických hladin např. v adsorbovaných molekulách.
- **Řádkovací tunelový mikroskop (STM)**. Byl objeven na začátku 80. let v laboratořích IBM.
- Ostrý hrot (poloměr křivosti 50 až 100 nm) umístěný 0,5 až 1 nm nad zkoumaným povrchem.
- Díky piezoelektrickým výbrusům se pohybuje v osách X, Y a Z.
- Vložíme napětí mezi hrot a povrch -> protéká hrotem emisní tunelový proud (~ 1 nA).
- Hrotem pohybují třeba ve směru X a zpětnovazebně udržují konstantní proud -> musím pohybovat s hrotem ve směru Z, abych držel konstantní vzdálenost od povrchu.

Aplikace tunelového jevu

- Mohu tak získat topografický obraz zkoumaného povrchu.
- V laterální rovině je rozlišení na úrovni atomů.
- Ve vertikální rovině je rozlišení až 0,01 nm.
- Emisní proud nezávisí jen na vzdálenosti hrotu, ale také na hustotě elektronů na hladině, z které tunelují -> získám také hustotu elektronů na těchto hladinách.



Aplikace tunelového jevu

- STM je jedno z nejdokonalejších zařízení na zkoumání povrchu na atomárním měřítku.
- Tunelová emise se také uplatňuje jako zdroj elektronů, aniž bych potřeboval žhavenou katodu a nemusím dodávat energii.
- Mám velkou proudovou hustotu ihned po přiložení pole.
- Malá plocha hrotu -> bodový zdroj -> celkový proud je malý.
- Využití v elektronových mikroskopech, litografích, rentgenové lampy atp.
- Větší proud dosáhnu aplikací více hrotů nebo přímo břitů -> musí být dokonale stejné -> rovnoměrná hustota proudu.

Procesy v pevné látce vyvolané dopadem záření

Objemové jevy

- Dopadne-li el.-mag. záření na povrch, tak se částečně odrazí, pohltí nebo rozptýlí.
- Mohu ovlivnit vodivost hlavně polovodičů.
 - A. Dlouhá vlnová délka záření -> pohlcení mřížkou -> ohřev látky -> změna pohyblivosti nosičů náboje a jejich koncentrace -> změna odporu látky s teplotou -> **bolometr** – změna teploty díky pohlcenému záření je úměrná elektrickému odporu -> lze měřit výkon záření, které se plně pohltí v látce ($\Delta T = 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}$).
 - B. Záření může být absorbováno přímo vodivostními elektrony -> přerozdělení elektronů ve vodivostním pásu -> změna vodivosti. Pozorováno jen za nízkých teplot!!!
 - C. Dostatečně malá vlnová délka vede ke generaci párů elektron-díra v polovodičích nebo k excitaci vázaných elektronů do vodivostního pásu v polovodičích -> velký koeficient absorpce díky velké koncentraci elektronů schopných být excitovány.