

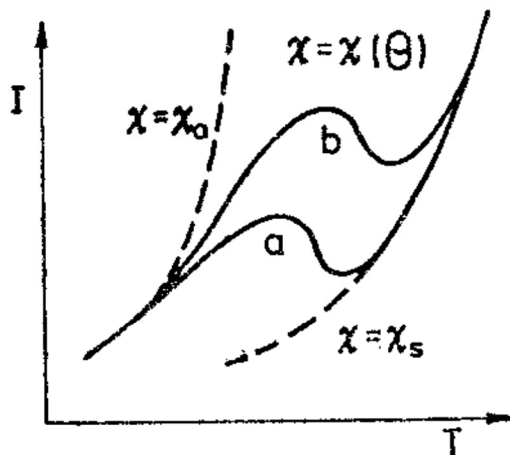
Termoemise - kovy

- Vyjadřuje termoemisní proud elektronů z povrchu kovů.
- A_0 – Sommerfeldova konstanta.
- Výstupní práce a střední koeficient odrazu elektronu od potenciálové bariéry jsou funkcí teploty!!!
- R se s teplotou mění jen málo.
- Výstupní práci ovlivňuje: čistota a stav povrchu a také změna obsazení pásů v důsledků teplotní roztažnosti látky (změna mřížkového parametru).
- Pro malou změnu teploty a čistý povrch lze aproximovat výstupní práci:

$$\chi(T) = \chi(T_0) + \alpha(T - T_0)$$

Termoemise - kovy

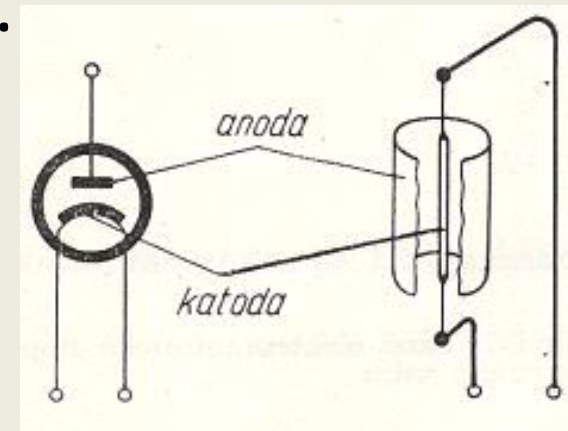
- Adsorbovaná látka na povrchu může výstupní práci kovu radikálně změnit v závislosti na teplotě (desorpce, difúze, adsorpce) a pak výstupní práce je složitou funkcí teploty -> termoemisní proud je komplikovaný



Obr. 6.2. Závislost termoemisního proudu I na teplotě emitoru s adsorbovanou vrstvou látky snižující výstupní práci. Pokrytí Θ se mění s teplotou T povrchu. Čárkovaně jsou vyznačeny charakteristiky pro čistou látku substrátu ($\chi = \chi_s$) a adsorbátu ($\chi = \chi_a$)

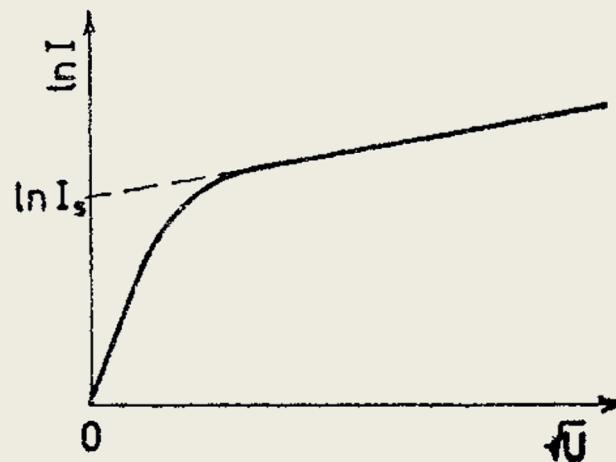
Termoemise – měření výstupní práce

- Z termoemisního proudu mohu stanovit výstupní práci materiálu.
- Používá se diodové uspořádání, kde katoda je žhavená a z materiálu, který zkoumám.
- Vystupující elektrony tvoří oblak záporného náboje -> vrací další elektrony zpět.
- Musím použít anodové napětí a odebírat elektrony.
- Pak ovlivním výstupní práci!!!



Termoemise – měření výstupní práce

- Základní postup:
 - nastavím napětí na anodě
 - změřím proud diodou pro danou teplotu katody
 - vynesu závislost $\ln I = f(\sqrt{U})$
 - emisní proud extrapoluji do nulového napětí



Termoemise – měření výstupní práce

- Z Richardson-Dushmanova vztahu spočítám výstupní práci:

$$\chi = kT \ln \frac{SA_0 T^2}{I_s}$$

- Protože je výstupní práce závislá na teplotě katody, je vhodné měřit i koeficient α .
- Měřím závislost emisního proudu I_s na teplotě.
- Musím si přepsat Richardson-Dushmanův vztah na:

Termoemise – měření výstupní práce

$$\begin{aligned}\frac{I_s}{S} = j_s &= A_0(1 - \bar{R}) T^2 \exp \left\{ - \frac{\chi(T)}{kT} \right\} = \\ &= A_0(1 - \bar{R}) \exp \left\{ - \frac{\alpha}{k} \right\} T^2 \exp \left\{ - \frac{\chi(T_0) - \alpha T_0}{kT} \right\} = \\ &= AT^2 \exp \left\{ - \frac{\chi_R}{kT} \right\}.\end{aligned}$$

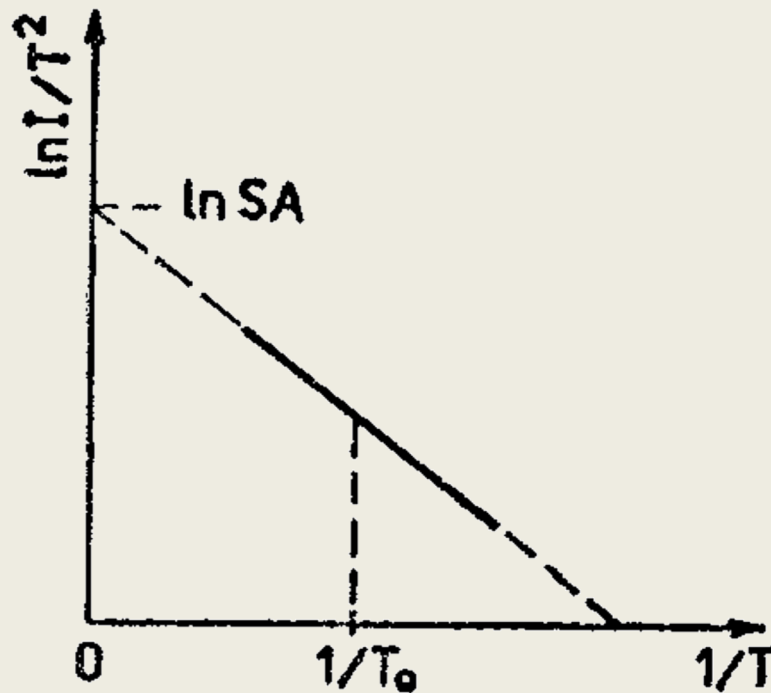
- Richardsonova konstanta: $A = A_0(1 - \bar{R}) \exp \{ -\alpha/k \}$
- Richardsonova výstupní práce: $\chi_R = \chi(T_0) - \alpha T_0$
- Tyto materiálové konstanty jsou teplotně nezávislé.

Termoemise – měření výstupní práce

- Pokud je koeficient α konstantní pro všechny teploty pak *Richardsonova výstupní práce* χ_R je vlastně výstupní práce při absolutní nule $T = 0$ K.
- Logaritmováním dostanu
$$\ln \frac{I_s}{ST^2} = \ln A - \frac{\chi_R}{k} \frac{1}{T}$$
- Experimentálně určenou závislost $I_s(T)$ lze linearizovat na tvar: $\ln I_s/T^2 = f(1/T)$
- Vynesení do grafu získám přímku.

Termoemise – měření výstupní práce

- Ze směrnice určíme Richardsonovu výstupní práci χ_R a lineární extrapolace do $1/T = 0$ nám dává Richardsonovu konstantu A .



Termoemise – měření výstupní práce

- Jiná měřicí metoda spočívá v měření ochlazování žhavené katody díky emisi elektronů – kalorimetrická metoda.
- Uvolněný elektron do vakua odebere z materiálu energii = výstupní práce + kinetická energie -> katoda se musí ochladit.
- Kin. energii získá elektron např. od kmitajících atomů krystalové mřížky pevné látky zahřáté na teplotu T .
- Emitované elektrony musím opět odsávat anodovým napětím -> typicky diodové uspořádání.
- K udržení konstantní teploty žhavené katody, musím zvýšit žhavicí příkon o $I_s(\chi + 2kT)/e$ wattů.

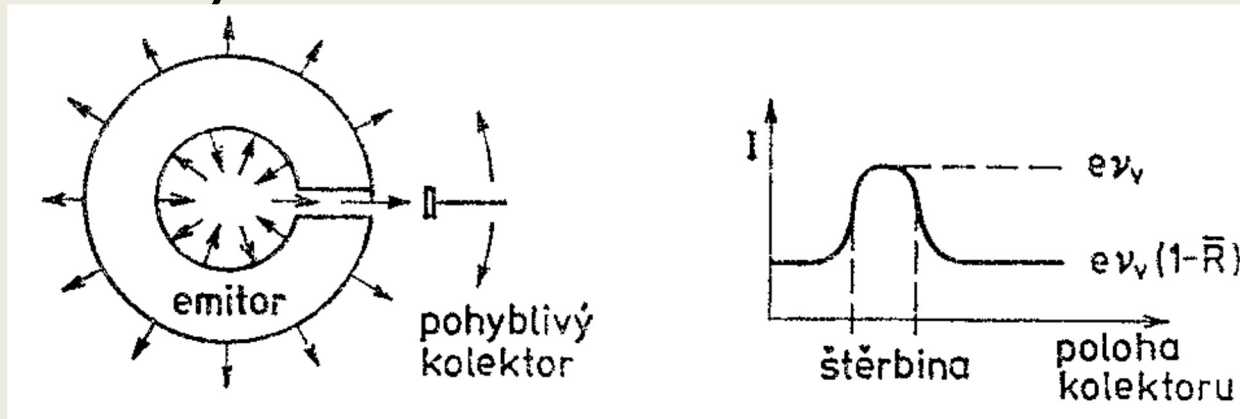
Termoemise – měření výstupní práce

- V praxi musí být příkon spotřebovaný v ostatních částech el. obvodu zanedbatelný oproti příkonu žhavení katody.
- Musím měřit: emisní proud I_s , odpor katody R , žhavicí proud I_z -> žhavicí příkon je RI_z^2 .
- Začne-li téct emisní proud musím zvýšit žhavicí proud o ΔI_z .
- Pro typické podmínky: $T = 2000$ K a $\chi = 4,5$ eV je odváděný výkon emitovanými elektrony ≈ 5 mW.
- Tedy $\Delta I_z \ll I_z$ a $R(I_z + \Delta I_z)^2 \approx RI_z^2 + 2RI_z\Delta I_z$.
- Změna příkonu kompenzující ochlazování katody je:

$$2RI_z \Delta I_z = (2kT + \chi) I_s / e \quad \text{a odtud} \quad \chi = \frac{2eRI_z \Delta I_z}{I_s} - 2kT$$

Termoemise – měření výstupní práce

- Efúzní metoda spočívá na principu rovnováhy toků emitovaných elektronů a elektronů dopadajících zpátky na povrch katody.
- Katoda má tvar uzavřené dutiny se štěrbinou.
- Uvnitř dutiny mají elektrony Maxwellovské rozdělení rychlostí.



Termoemise – měření výstupní práce

- Pro emisní proud opět platí Richardson-Dushmanův zákon.
- Štěrbina neovlivňuje rovnováhu v dutině.
- Tok elektronů vystupujících z dutiny se řídí Maxwellovským rozdělením a
není ovlivněn koeficientem odrazu $\bar{R}$.
$$v_v = n_v \left(\frac{kT}{2\pi m} \right)^{1/2}$$
- Vnější detektorem s malým prostorovým rozlišením
mohu měřit emitovaný proud
 - jen ze štěrbin
 - jen z vnějšího povrchu žhavené katody.
- Jejich porovnáním mohu stanovit koeficient odrazu $\bar{R}$.

Termoemise – termokatoda

- Termoemise je pozorována u většiny materiálů.
- Vhodný materiál může být účinný zdroj elektronů – termokatoda.
- Vysoká účinnost termokatody = nízká výstupní práce χ při nízké provozní teplotě T_p .
- Dříve se používaly termokatody z čistých kovů, dnes se používají oxidové katody s emisí vrstvou.
- Typická životnost termokatody je 10^4 až 10^5 hodin.
- Z ekonomického hlediska je důležitý poměr hustoty emisního proudu k příkonu vztaženému na plochu katody.

Termoemise – termokatoda

Materiál katody	χ (eV)	A ($A \cdot cm^{-2} K^{-2}$)	T_p (K)	j/P ($mA \cdot W^{-1}$)	χ/T_p ($10^{-3} eV \cdot K^{-1}$)
W	4,5	60—100	2500		1,8
Mo	4,2	55	2300		1,83
Ta	4,1	40—60	2100	2—10	1,95
LaB ₆	2,7	30—70	1700—1800		1,55
W + Th	2,6	3	1900		1,37
W + Ba	1,6	1,5	1000	5—100	1,6
W — O — Ba	1,3	0,18	1000		1,3
Ba + Sr na Ni	1	$10^{-2} — 10^{-3}$	1100		0,9
Ba + Sr na W	1,6	$10^{-2} — 10^{-3}$	1400	100—1000	1,14
ThO na W	1—1,5		1800		0,7

Termoemise – termokatoda

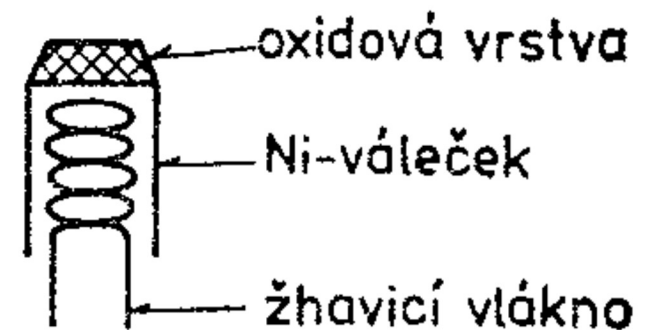
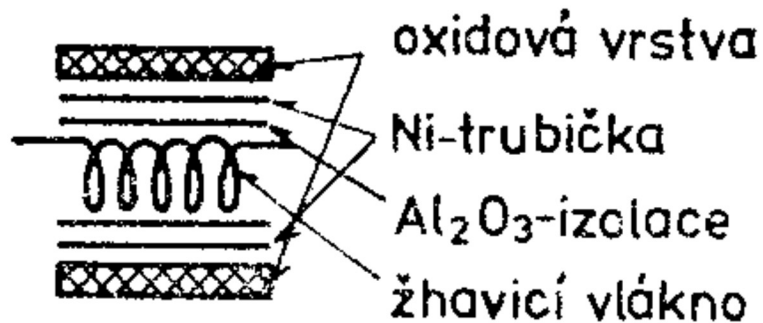
- **Katody z čistých kovů** jsou nejstarší. Vybíraly se kovy s vysokou teplotou tání.
- Vyrábějí se ve formě drátků, vláken s průměrem 0,1 mm.
- Mají stále emisní vlastnosti a odolnost vůči vystavení atmosféře.
- Výrobní cena je relativně nízká <-> cena drahého kovu.
- Nevýhody: vysoká provozní teplota, vypařování kovu, malá životnost.
- Mezi tyto katody řadíme i populární sloučenina LaB_6 , která je hodně vodivá, ale oproti čistým kovům má nízkou výstupní práci.

Termoemise – termokatoda

- **Katody oxidové** byly vyvinuté jako náhrada kovových.
- Použití levnějších materiálů $\leftrightarrow$ komplikovaná konstrukce, nejsou tak robustní.
- Na kovové jádro s obsahem Si se nanáší vrstva uhličitanů Ba, Sr nebo Ca silná několik desetin mm.
- Katoda se musí aktivovat: zahřát ve vakuu na def. teplotu $\rightarrow$ uhlík odejde a vytvoří se oxid.
- Dále povrchové stavy tvoří ionty Ba a Sr.
- Vzniklý oxid se chová jako polovodič typu N s nízkou χ .
- Mezi jádrem a oxidovou vrstvou se tvoří v průběhu činnosti katody mezivrstva SiO_2 $\rightarrow$ roste izolační bariéra pro emitované elektrony z jádra $\rightarrow$ po určité době přestane termokatoda emitovat.

Termoemise – termokatoda

- Příklady konstrukce oxidových termokatod.

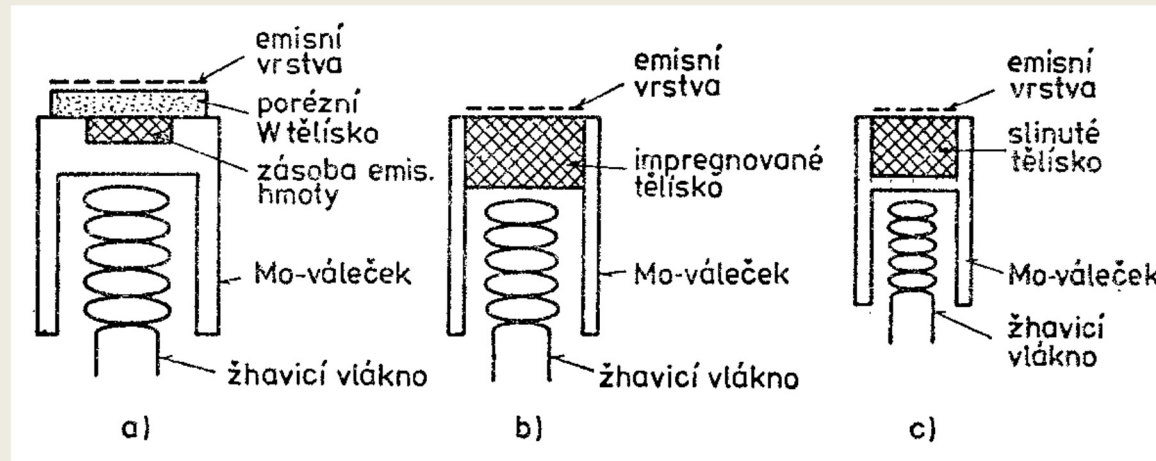


- **Katody povlakové.** Na kovovou katodu nanese vrstvu elektropozitivního prvku.
- Nejpoužívanější povlakovaná termokatoda je tzv. thoriovaný wolfram.
- Výroba: slinutí práškového W s ThO₂ -> vytvoří se drátek. Během aktivace se ThO₂ redukuje na Th a ten difunduje na povrch.
- Životnost a provozní teplota -> odpařování Th iontů z povrchu.

Termoemise – termokatoda

- **Katody zásobníkové.** Je to modifikace oxidových katod.
- Ba a Sr jsou zde obsaženy ve formě uhličitanů v zásobníku.
- Z něho se během provozu postupně uvolňují a difundují porézním materiálem na povrch.
- Zde tvoří vrstvu kladných iontů $\rightarrow$ snížení χ .
- a) L-katoda – uhličitan Ba a Sr je uložen v dutině pod porézním W.
- b) Impregnovaná katoda – porézní těleso je nasyceno uhličitaný Ba a Sr.
- c) Slinovaná katoda – porézní tělísko je slisováno ze směsi W, Mo a hlinitanu Ba.
- Pracují za teploty 1400 K a dávají emisní proud až 5 A cm^{-2} .

Termoemise – termokatoda

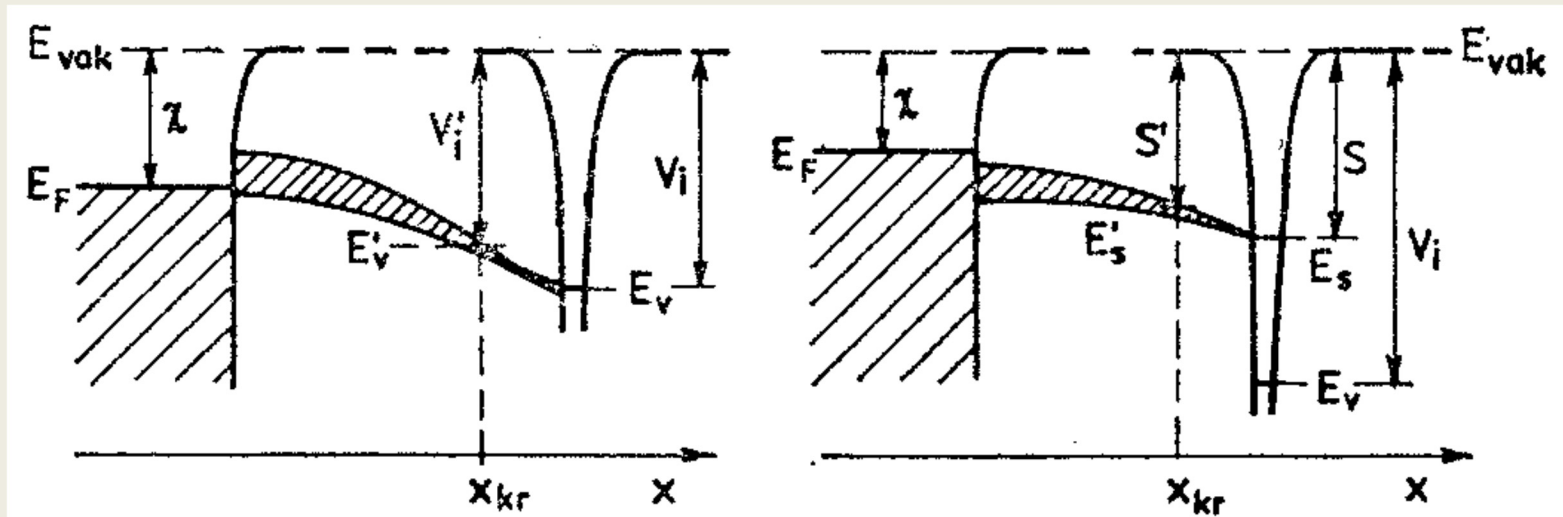


- Uplatnění termokatod -> zdroj elektronů.
- Vysílací elektronky, výkonové zesilovací lampy, CRT obrazovky, klystrony, magnetrony, elektronové mikroskopy SEM a TEM, elektronová litografie, iontové dělo.

Termoemise – iontů

- Zvýšená teplota povrchu má za následek:
 - Odcházení atomů látky – **vypařování** – potřebuji vynaložit výparné teplo Q .
 - Odcházení cizích atomů z povrchu – **desorpce** – musím vynaložit desorpční teplo Q .
- Tyto částice mohou také odcházet ve formě **iontu** kladného nebo záporného.
- Atom na povrchu sdílí elektrony s atomy pevné látky -> atom se vzdaluje od povrchu -> dosáhne kritické vzdálenosti od povrchu x_{kr} , kdy už elektron může být sdílen s povrchem jen se zanedbatelnou pravděpodobností.
- Tedy atom odejde z povrchu bez elektronu nebo s elektronem navíc (záleží na tom, kde je sdílený elektron v okamžiku dosažení vzdálenosti x_{kr}).
- Popisuje to Gurneyův model sdíleného adsorbovaného atomu.

Termoemise – iontů



- Ve vzdálenosti x_{kr} má valenční elektron nižší vazební energii V_i' díky interakci s pevnou látkou.
- Pravděpodobnost, že elektron je na hladině E_v' je dána F.-D. rozdělením.
- K emisi kladného iontu dojde tehdy, když atom ve vzdálenosti x_{kr} je iontem a má aspoň energii odpovídající desorpčnímu teplu.
- Stupeň ionizace α udává poměr mezi tokem kladných iontů v_{i+} a neutrálů v_a .

Termoemise – iontů

$$\alpha = \frac{v_{i+}}{v_a} = \frac{g_{i+}}{g_a} \frac{w_{i+}}{w_a} = \frac{g_{i+}}{g_a} \exp\left(-\frac{V'_i - \chi}{kT}\right) \exp\left(-\frac{Q_{i+} - Q_a}{kT}\right)$$

- Pokud si uvědomíme, že rozdíl výparných (desorpčních) energií $Q_{i+} - Q_a$ je roven rozdílu vazebních energií $V_i - V'_i$, pak lze psát:

$$\alpha = \frac{g_{i+}}{g_a} \exp\left(-\frac{V_i - \chi}{kT}\right)$$

- Nazývá se to **Sahova-Langmuirova rovnice**.
- Ke vzniku iontů dochází na povrchu s vysokou výstupní prací a ionizované částice mají nízký ionizační potenciál.
- Typicky Cs, K, Na, Li ($V_i \approx 3,9$ až $5,4$ eV) na povrchu W, Mo, Ta ($\chi \approx 4$ až $4,5$ eV).

Termoemise – iontů

- U záporné ionizace převezme atom elektron z pevné látky, poněvadž neobsazená hladina leží výše jak Fermiho mez.
- Stupeň ionizace pak je:
$$\alpha_- = \frac{g_{i-}}{g_a} \exp\left(\frac{S - \chi}{kT}\right)$$
- Záporná ionizace dochází u atomů s vysokou elektronovou afinitou S a nízkou výstupní prací pevné látky.
- Měření emise záporných iontů je komplikováno přítomností také termoemisních elektronů.
- Měření záporné termoemise slouží k experimentálnímu stanovení elektronové afinity.

Termoemise – iontů

- **Termoiontová emise.** Dochází k ionizaci a desorpci nečistot absorbovaných v objemu látky difundujících na povrch nebo k vypařování iontů pevné látky.
- Emitované částice jsou vždy v tepelné rovnováze s pevnou látkou.
- Zdroj kladných nebo záporných iontů.
- Zdroj přesného množství neutrálních částic:
 - Množství iontů mohou přesně změřit díky nesenému náboji
 - Ionty pak rekombinují s elektrony na neutrály.
- **Povrchová ionizace.** Děj, kdy jsou ionizovány částice dopadající na povrch z okolí.
- Znám tok částic na povrch.
- Adsorbované částice na povrchu musí setrvat určitou dobu, aby došlo k tepelné rovnováze s povrchem, pak jsou desorbovány ve formě iontu.
- Po určité době nastane rovnováha mezi adsorpcí a desorpcí.
- Tedy celkový tok $\nu = \nu_i + \nu_a \rightarrow$ koeficient ionizace je
$$\beta = \frac{\nu_i}{\nu} = \frac{\nu_i}{\nu_i + \nu_a} = \frac{\alpha}{1 + \alpha}$$