

Hysterézne správanie reaktívneho magnetronového naprašovania

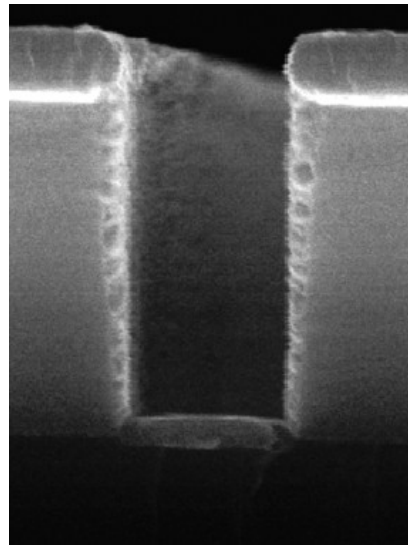
F7544 Experimentální metody 1

Literatúra

- R. F. Bunshah, *“Handbook of deposition technologies for films and coatings”*, Noyes Publications, Los Angeles, California (1994) ISBN: 0-8155-1337-2
- R. A. Powel, S. M. Rossnagel, *“PVD for Microelectronics”*, Academic Press, Inc., Boston (1998) ISBN: 9780125330268
- D. Depla, S. Mahieu, Editors, *“Reactive Sputter Deposition”*, Springer, (2008) ISBN: 978-3-540-76664-3
- S. Berg, T. Nyberg, “Fundamental understanding and modeling of reactive sputtering processes”, *Thin Solid Films* 476 (2005) 215–230
- T. Nyberg, S. Berg, U. Helmersson, K. Hartig, *“Eliminating hysteresis effect for reactive sputtering processes”*, *Applied Physics Letters* 86 (2005) 164106.

Naprašovanie – motivácia

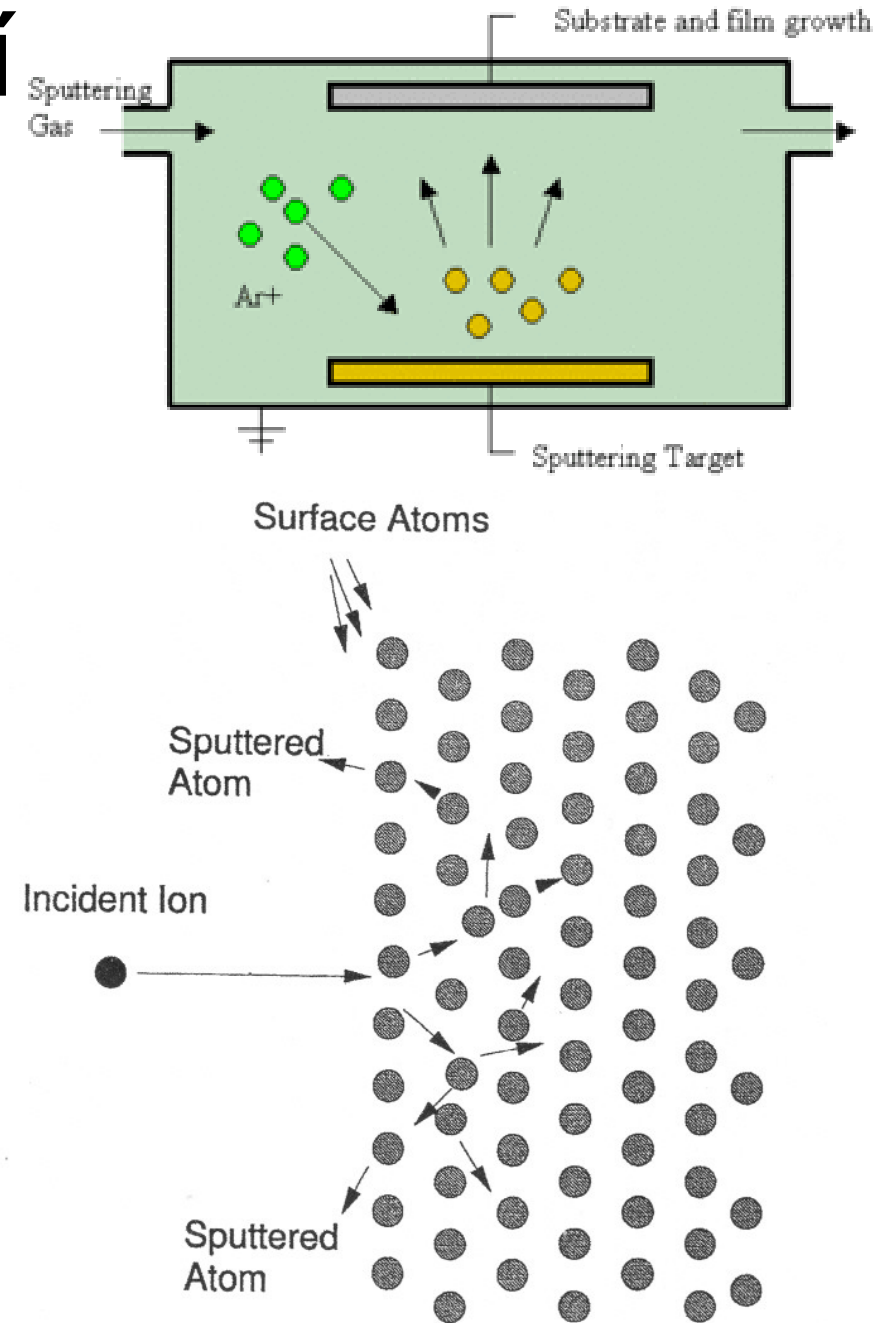
- Naprašovanie spolu s naparovaním, depozíciou katódovým oblúkom a laserovou depozíciou patrí do skupiny PVD (Physical Vapour Deposition) techník, ktorými je možné pripraviť tenké vrstvy
- Použitie tenkých vrstiev: priemysel, mikroelektronika, optické a dekoratívne povlaky



Naprašovanie – základné princípy

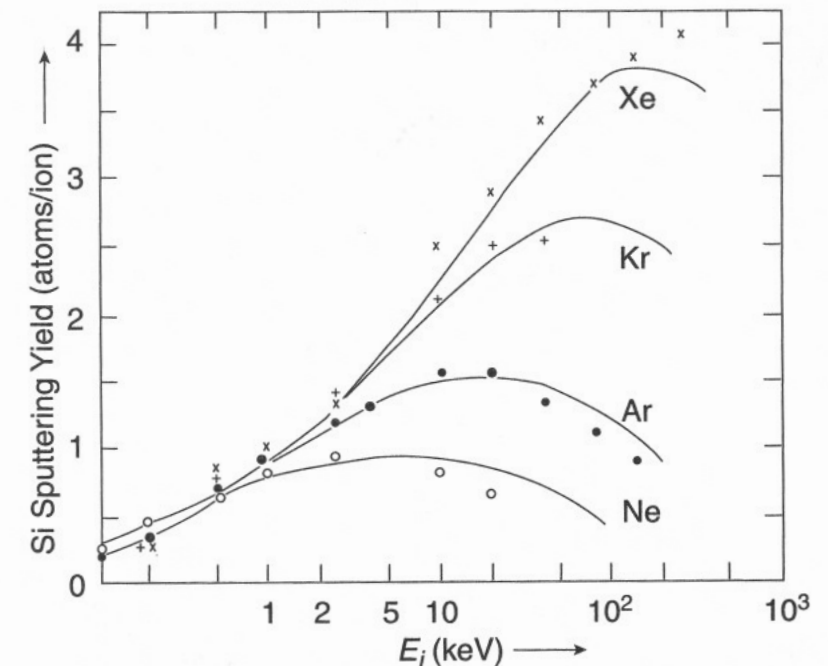
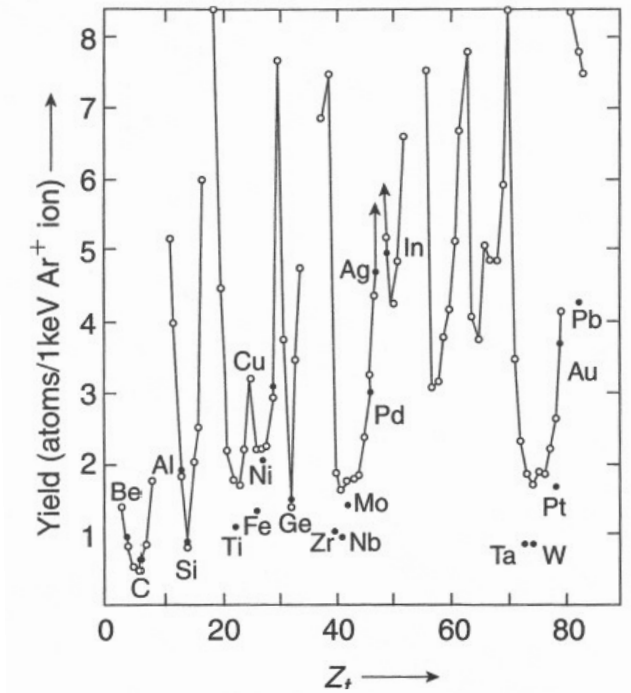
- Ióny inertného plynu z výboja sú priťahované na povrch katódy / terča
- Dopadajúce ióny vyvolávajú kolízne kaskády do hĺbky niekoľkých atómových vrstiev od povrchu terča
- Častice terča sú odprašované z jeho povrchu, dopadajú na substrát kde sa tvorí tenká vrstva
- Definujeme výťažok rozprašovania (Sputtering yield) ako:

$$Y = \frac{(\text{počet rozprášených častíc})}{(\text{počet dopadajúcich častíc})}$$



Naprašovanie – základné princípy

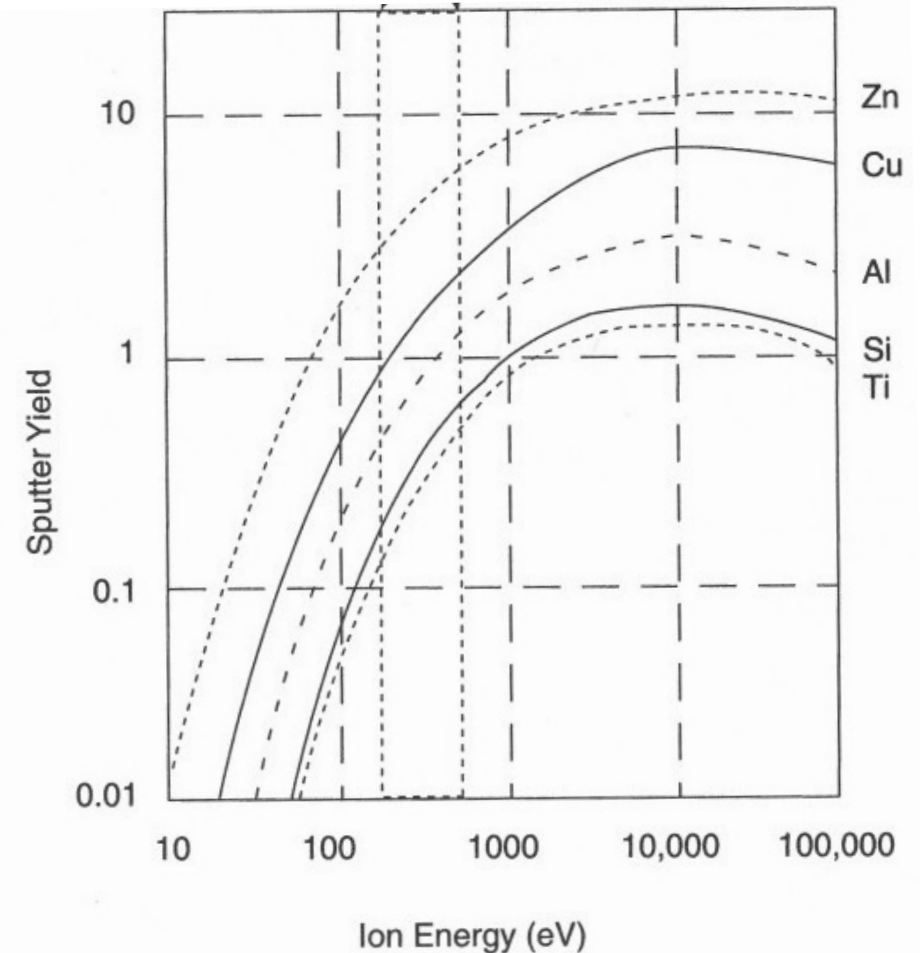
- Výťažok rozprašovania Y je závislý na type interagujúcich častíc ich energii a smere.
- Vychádzajúc zo ZZH častice s blízkou atomárnou hmotnosťou by mali mať vyšší Y vďaka efektívnemu prenosu hybnosti.
- Toto však platí hlavne pre častice s vysokou atomárnou hmotnosťou, pri časticiach s nižšou atomárnou hmotnosťou je Y závislý hlavne od väzbovej energie



Naprašovanie – základné princípy

Podľa energie dopadajúcich častíc:

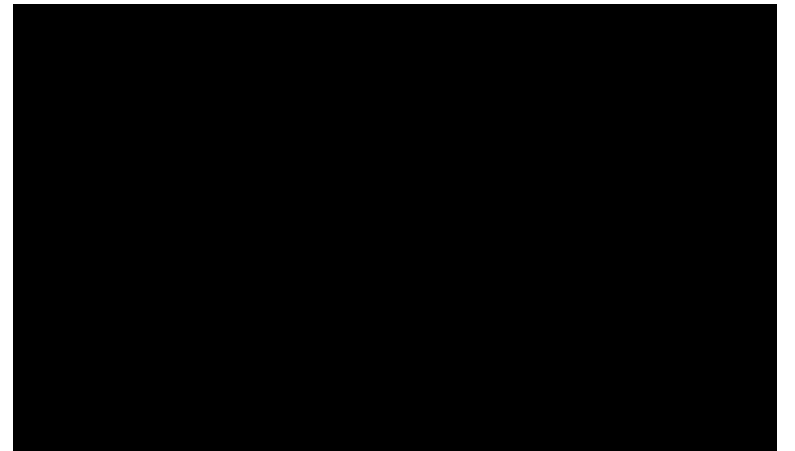
- Nízka energia $E < 50\text{eV}$ – veľmi malá energia na tvorbu lavín, avšak $Y \neq 0$
- Stredná energia $50\text{eV} < E < 1\text{keV}$ – najčastejšie používaný rozsah pre PVD procesy
- Vysoká energia $1\text{keV} < E < 50\text{keV}$ – tvoria sa sekundárne kaskády z pôvodne dislokovaných atómov
- Veľmi vysoká energia $50\text{keV} < E$ – dopadajúce častice tvoria kaskády až hlbšie v materiály, Y klesá



Naprašovanie – základné princípy

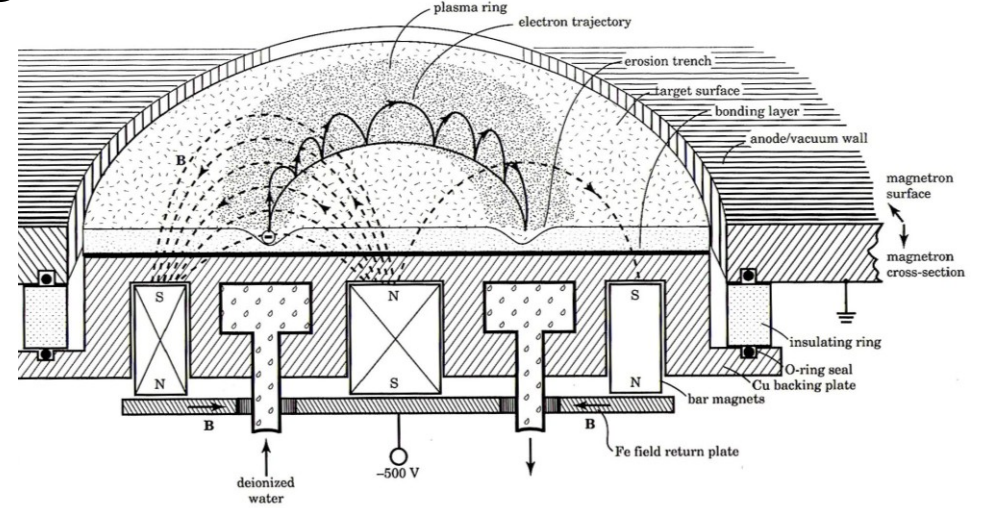
V závislosti na uhle, druhu dopadajúcich iónov, štruktúre materiálu majú odprášené častice rôzne uhlové rozdelenie

- Kosínové rozdelenie
- Nadkosínové rozdelenie- smer kolmý k povrchu je silne preferovaný
- Podkosínové/ srdcové rozdelenie – hlavne pri orientovaných kryštáloch
- Obecné $Y(E, \Theta) \approx \cos \Theta (1 + B \cos^2 \Theta)$ kde B je fitovací parameter



Magnetron – základný princíp

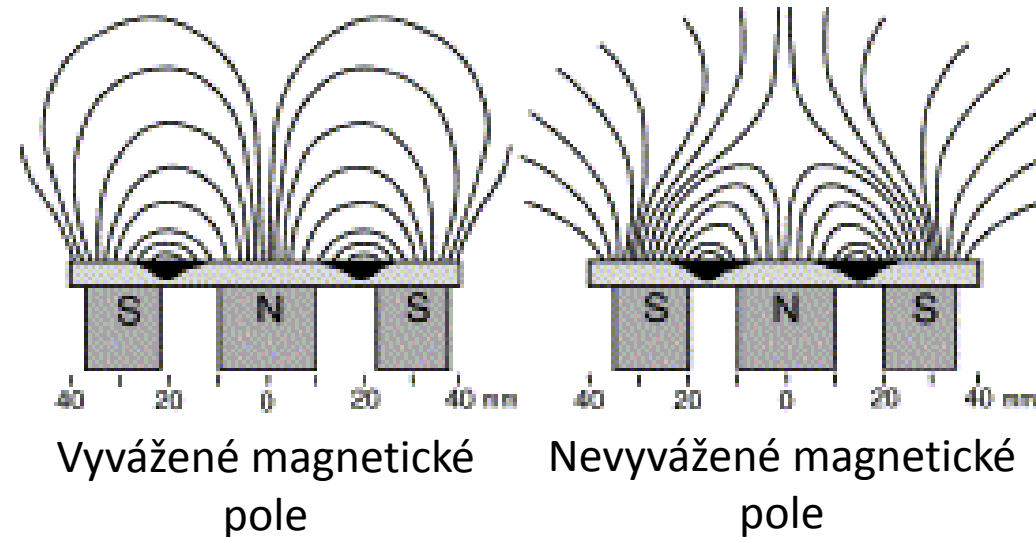
- Pridaním magnetického poľa sa predĺži dráha elektrónov → viac zrážok → efektívnejšia ionizácia
- Násobne sa zníži zápalné napätie a zvýši sa prúd
- Odprašuje sa však nehomogénne, najviac v miestach kde je najväčší dopad iónov, vytvára sa erózna priekopa (racetrack)
- Bežne sa spotrebuje len 30-60% terča



Magnetron – základný princíp

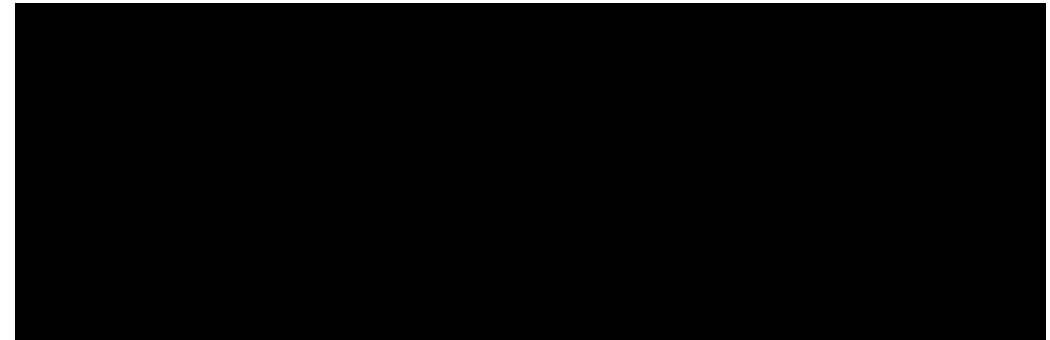
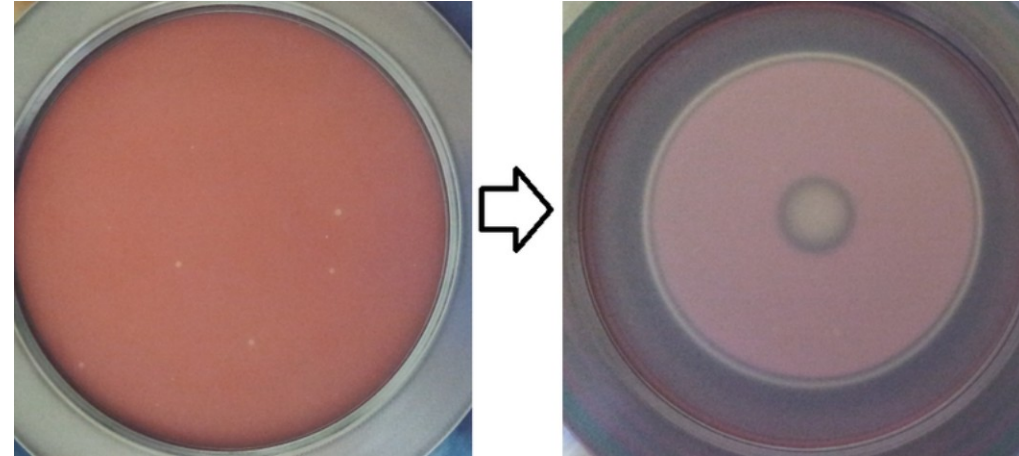
Sú charakteristické dve konfigurácie magnetického poľa:

- Vyvážené – uzavreté magnetické pole, vytvára plazmu s vyššou hustotou, lepšie sa využíva terč
- Nevyvážené – magnetické pole je otvorené, vytvára sa vodivý kanál až k substrátu – vyšší bombard iónov a elektrónov na substrát, nižšia efektivita rozprašovania



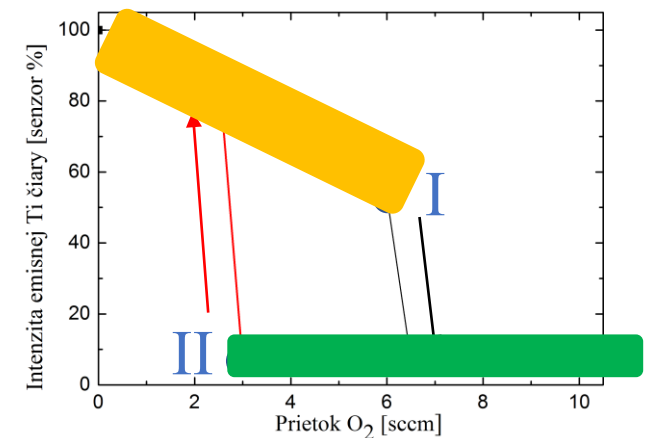
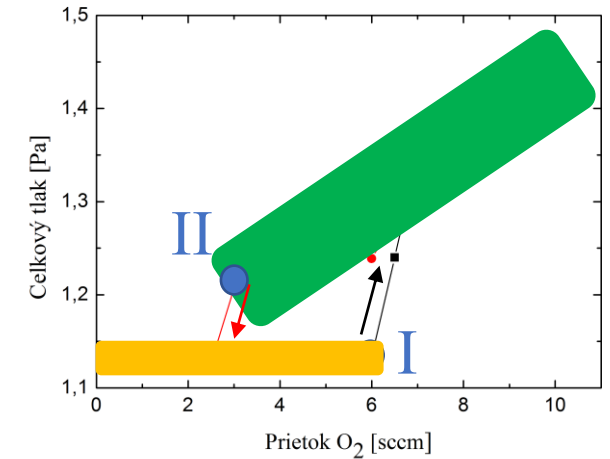
Reaktívne magnetronové naprašovanie

- Do procesu sa pridá plyn ako N_2 , O_2 , C_2H_2 , podmienky depozície sa menia
- Zvyšovaním prietoku reaktívneho plynu sa tento plyn adsorbuje na všetky dostupné povrchy, vrátane povrchu terča
- Vytvára sa tenká vrstva zložených molekúl
- Ak Y_c týchto molekúl je výrazne menší (typicky $\sim 10-20x$) ako Y_m čistého procesu systém podlieha **hysteréznemu správaniu**
- Hysterézne správanie je možné pozorovať na takmer všetkých parametroch procesu, každý sa však správa rôzne



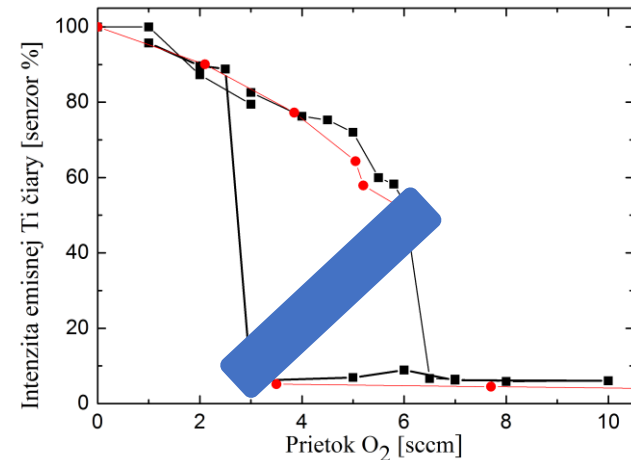
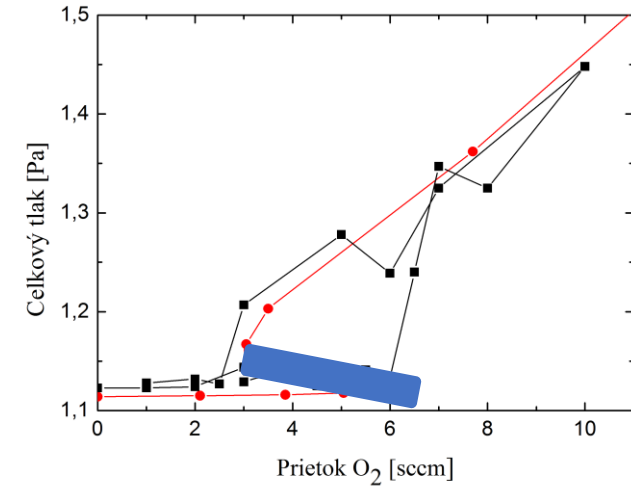
Reaktívne magnetronové naprašovanie

- Zvyšovaním prietoku reaktívneho plynu sa tento plyn adsorbuje na všetky povrchy, avšak povrch terča sa kontinuálne odprašuje a teda ostáva z väčšej časti metalickým, hovoríme o **metalickom režime**
- Ak dôjde k nasýteniu adsorbpcie v bode **I**, v systéme sa prudko hromadí reaktívny plyn a systém prechádza do **otráveného / zloženého režimu** kedy celý povrch terča je pokrytý zloženými molekulami.
- Pre spätné vrátenie sa do metalického módu je nutné výrazne znížiť prietok reaktívneho plynu (bod **II**)
- Body **I** a **II** sú takzvanými kritickými bodmi a definujú hysteréznu krivku



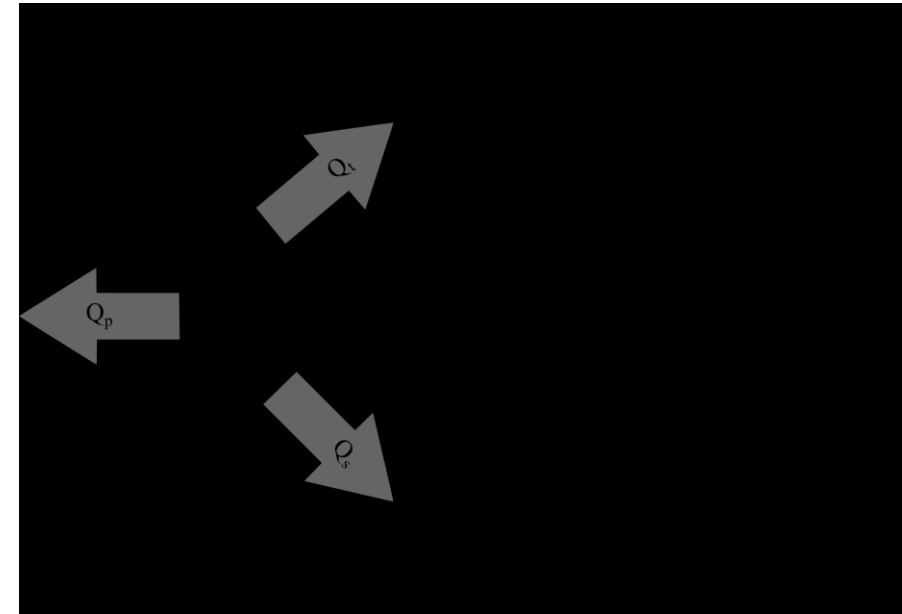
Reaktívne magnetronové naprašovanie

- Podmienky medzi oboma kritickými bodmi sú nestabilné a pri stabilnom prietoku nedosiahnuteľné
- V tejto oblasti sa však tvoria stechiometrické vrstvy s relatívne vysokou depozičnou rýchlosťou
- Preto sa používa spätnoväzobné riadenie ktoré prietok plynu vhodne pulzuje a tým je možné dosiahnuť aj body v **prechodovej oblasti**



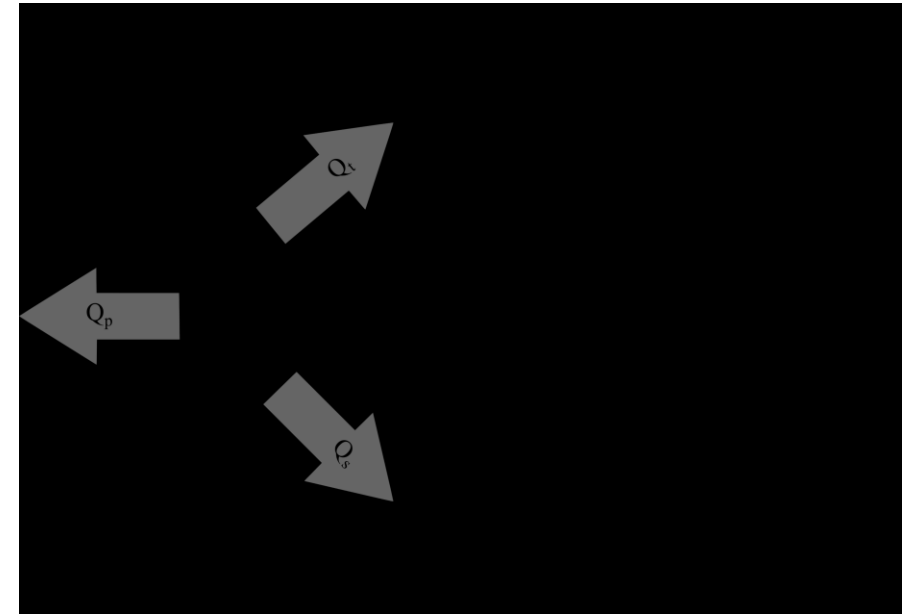
Reaktívne magnetronové naprašovanie

- Bergov model zjednodušene popisuje hysterézne správanie
- Uvažuje rovnovážny stav procesov prebiehajúcich na terči a substráte
- Uvažuje rovnomerné rozloženie odprašovania z celého povrchu terča, na povrchu terča sa tvorí len monovrstva zložených molekúl, zanedbáva sa uhlová distribúciu odprašovania a transport častíc na substrát



Reaktívne magnetronové naprašovanie

- Terč sa odprašuje ale zároveň otravuje.
Pre daný parciálny tlak reaktívneho plynu existuje rovnovážny stav kedy Θ_t označuje časť terča pokrytú zloženými molekulami, a $(1-\Theta_t)$ nezreagovanú metalickú časť
- Podobne na substráte je definovaná časť pokrytá zloženými molekulami Θ_s a metalickými atómami $(1-\Theta_s)$



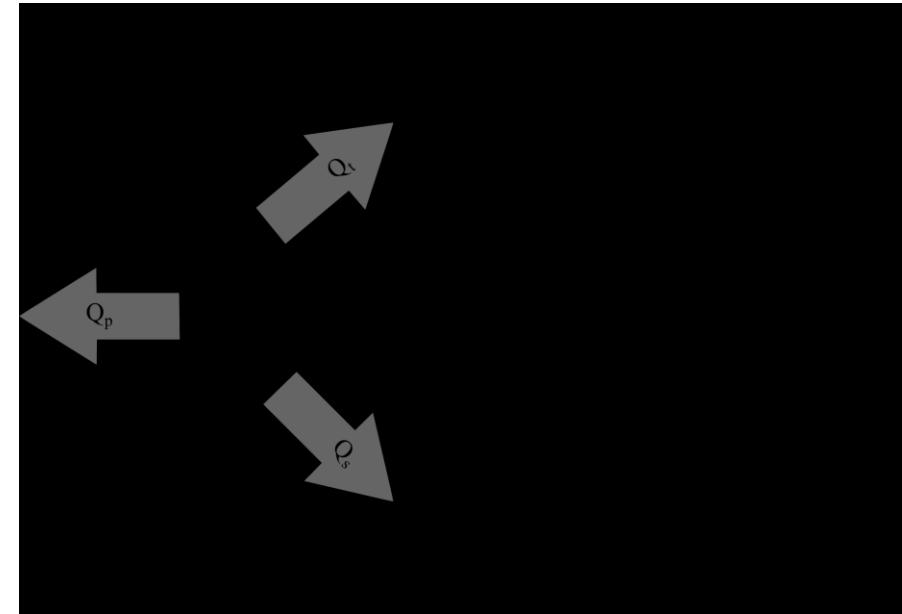
141

Reaktívne magnetrónové naprašovanie

Celková spotreba kyslíka Q_{tot} je daná súčtom spotreby na terči Q_t , na substráte Q_s a prietokom vyčerpaným vývevami Q_p .

- $Q_t = \alpha \frac{p}{\sqrt{2\pi m k_b T_s}} (1 - \Theta_t) A_t$
- $Q_s = \alpha \frac{p}{\sqrt{2\pi m k_b T_t}} (1 - \Theta_s) A_s$
- $Q_p = Sp$

kde T_t, T_s a A_t, A_s sú teploty a plochy substrátu a terča, p je parciálny tlak a m hmotnosť reaktívneho plynu, α pravdepodobnosť zachytenia reaktívnej molekuly na nezreagovanom povrchu a S je čerpacia rýchlosť

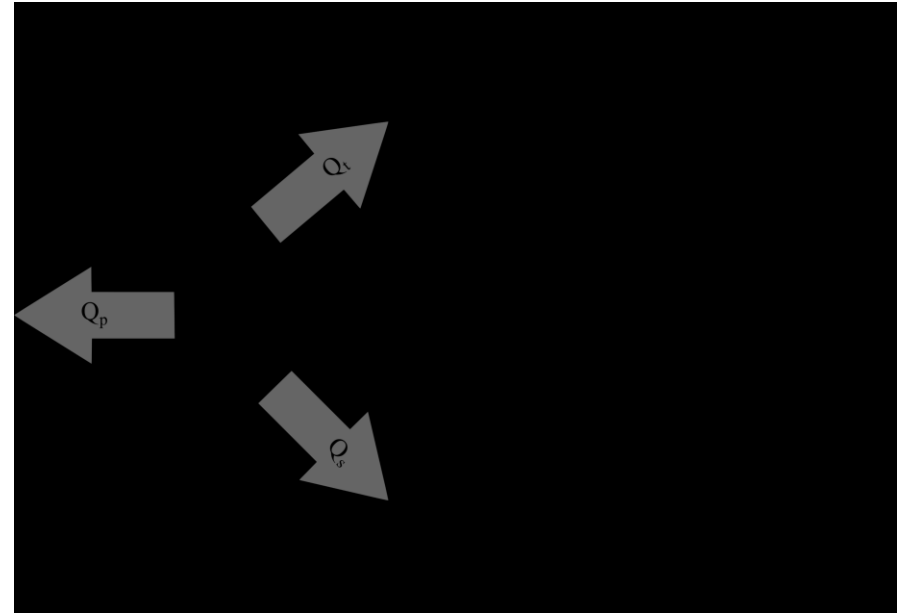


Reaktívne magnetronové naprašovanie

Pre počet zlúčených molekúl F_c a metalických častíc F_m z povrchu terča za jednotku času platí:

- $F_c = \frac{J}{q} Y_c \Theta_t A_t$
- $F_m = \frac{J}{q} Y_m (1 - \Theta_t) A_t$

kde J je prúdová hustota a q elementárny náboj



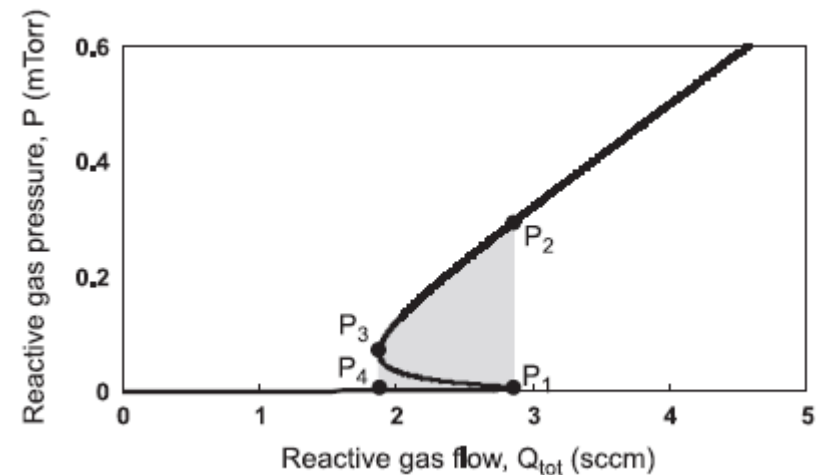
Reaktívne magnetronové naprašovanie

V stave rovnováhy musí byť počet odprášených zložených molekúl z terča rovnaký ako počet novo vytvorených zložených molekúl

$$\bullet \frac{J}{q} Y_c \Theta_t = \alpha \frac{p}{\sqrt{2\pi m k_b T_s}} (1 - \Theta_t)$$

Na substráte sa absorbuje toľko molekúl reaktívneho plynu za jednotku času, aký je rozdiel medzi počtom atómov kovu a zložených molekúl pokrývajúcich substrát za jednotku času

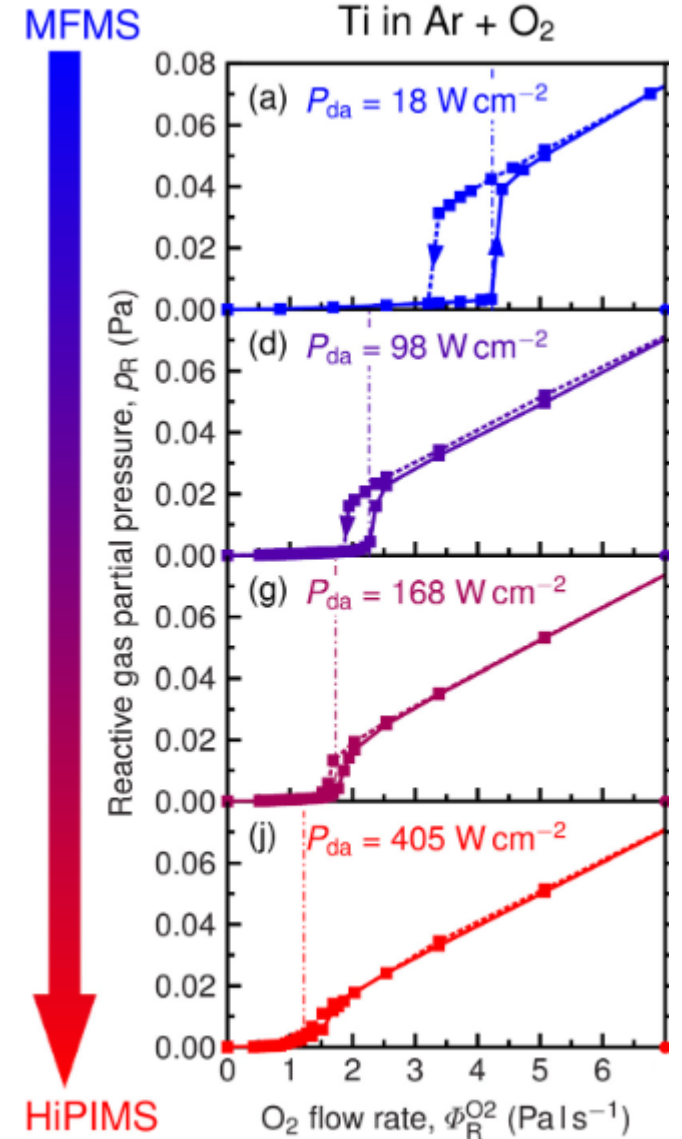
$$\bullet Q_s + F_c (1 - \Theta_s) = \Theta_s F_m$$



Reaktívne magnetrónové naprašovanie

Možnosti potlačenia hysterézneho správania:

- Zmenšenie terča - neefektívne
- Zvýšenie prúdu – problém so zahrievaním terča
- Zvýšenie čerpacej rýchlosti – veľká spotreba reaktívneho plynu
- HiPIMS – pulzy veľkého výkonu



Úloha:

Namerajte hysteréznú závislosť reaktívneho magnetronového naprašovania v depozičnom procese kedy odprašujeme z Ti terča a pripúšťame N_2 . Monitorujte závislosť napätia a parciálneho tlaku dusíku na prietoku reaktívneho plynu pri zvyšovaní a znižovaní prietoku dusíku. Simulujte tento proces pomocou Bergovho modelu tak, aby čo najlepšie sedeli kritické body hysterézneho správania.