

Kapitola 8

Magnetronové naprašování

8.1 Úvod

Motto: nejjednodušší způsob, jak změnit povrchové vlastnosti materiálu je pokrýt jej tenkou vrstvou (*Kdysi:* lovec opaloval hrot kopí v ohni, *Nyní:* nejrozšířenější metodou je magnetronové naprašování)

8.1.1 Úvodní pojmy

Rozprašování kovového (či keramického, dielektrického) terče, kdy z rozprášených částic roste vrstva - nový materiál je naprašen na materiálu, který chceme pokrýt. Rozlišujte – naprašování vrstvy × odprašování terče × rozprašování terče.

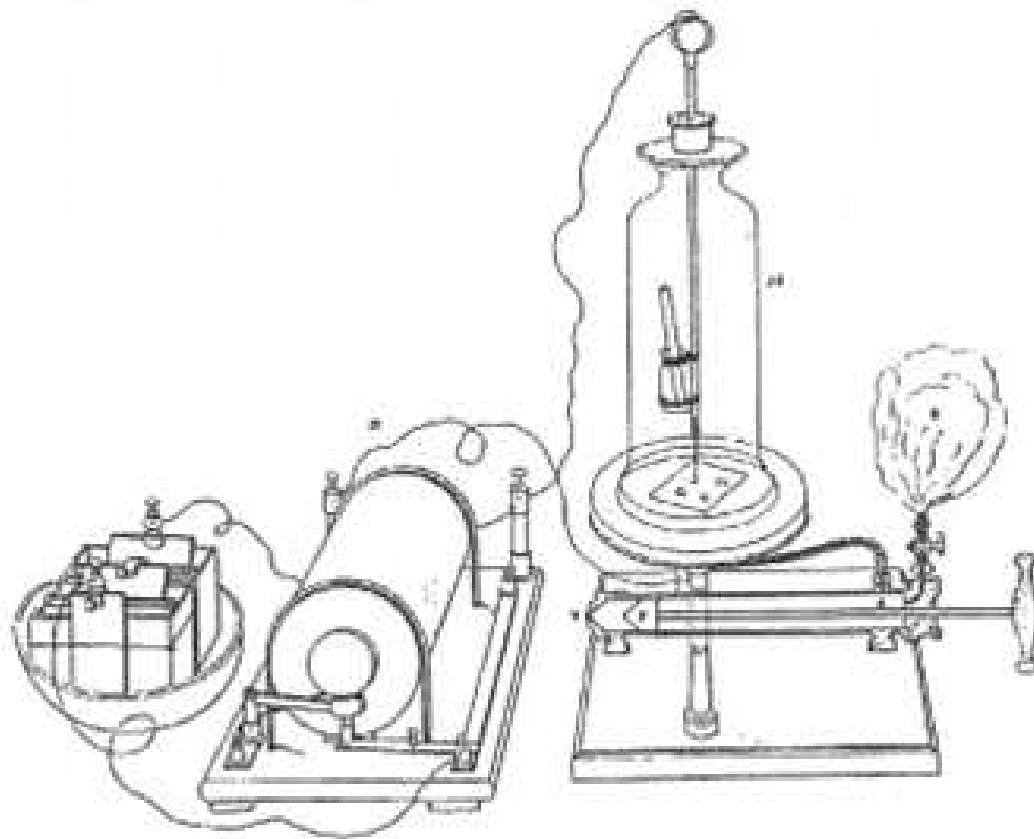
Nejedná se o CVD nebo PECVD metodu, kde molekuly částečně disociované v plynné fázi chemicky reagují na povrchu za vzniku kondenzátu a případně je tento proces doprovázen emisí nestabilních meziproductů.

Jedná se o PVD (Physical Vapour Deposition) proces

- techniky atomární povahy
- vrstva je deponována z jednotlivých atomů maximálně z clusterů atomů
- pokud probíhá nějaké chemická reakce tak zásadně na povrchu rostoucí vrstvy (nezávisle na zdroji atomů)
- patří sem
 - obloukové metody
 - napařování
 - naprašování

To sputter

- prskat
- kašlat, prskat (motor)
- zadržávat, dodělávat, zastavovat se
- mluvit zmateně, drmolit
- rozprašovat



Obrázek 8.1: Sir William Robert Grove a jeho aparatura

8.1.2 Historie:

1852 Sir William Robert Grove

- měděná elektroda pokrytá stříbrem
- ruční vývěva schopná vyčerpávat aparaturu jen na 1000 Pa
- byl pozorován růst vrstvy na stěnách aparatury a ničení katody (katoda se ničí a na anodě roste vrstva). Při záměně polarity deponovaná vrstva na anodě, nyní na katodě po krátké době zmizí.

1921 Sir John Thompson

- rapid ejection of small particles like as “frying bacon splutter fat” → spluttering

1923 Sir John Thompson

- vypouští ve svém článku “I” a od té doby se ujímá do té doby zastaralá varianta → sputtering

konec 19. století kovové vrstvy pro zrcadla

první polovina 20. století zlaté vrstvy pro fotografické desky

1970 napařování plně vytlačilo napařování na trhu

- lze napařovat i materiály s vysokou teplotou tání (např. Ti 1670°C)
- napařujeme z plochy, napařujeme z bodu

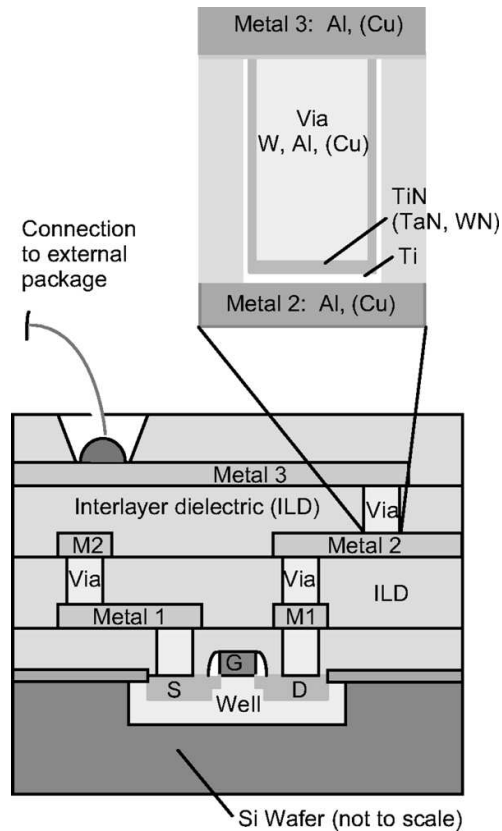
- napařování slitin je téměř nemožné protože depoziční rychlost komponent slitiny se liší \times při napařování se zachovává stochiometrie slitiny v rostoucí vrstvě

od konce 2. světové války po objevu tranzistoru se PVD a magnetronové napařování stává technologií mikroelektroniky, kde magnetronové napařování dominuje ve výrobě spojů.

tranzistor je skrze v podložce vyleptané otvory a zářezy vyplněné kovem (via – díra, trench – zákop) napojen na jiné tranzistory a i na zdroje signálu a vytváří tak síť, kde má vše své místo a účel.

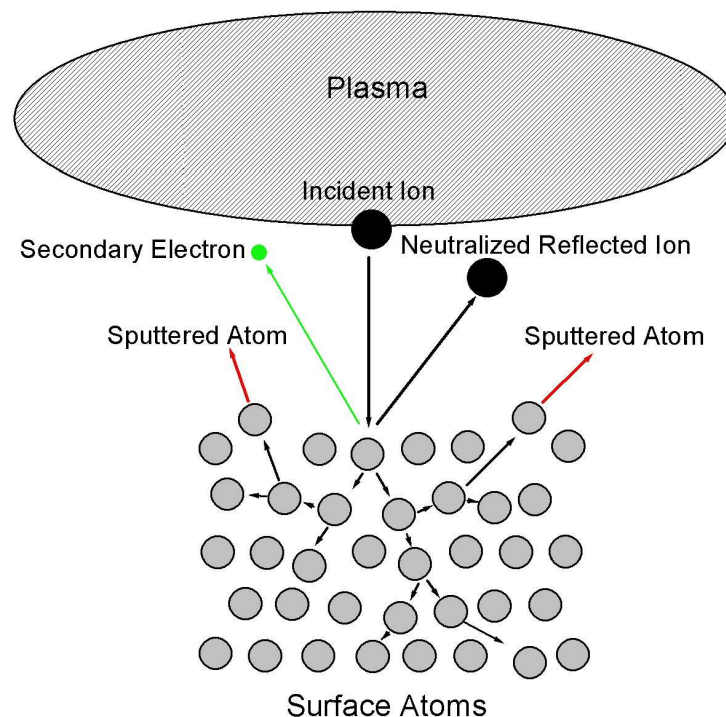
8.2 Fyzika Rozprašování

- pro tenké vrstvy, pro analytické účely (rozprašují materiál a studují jeho hmotnostní spektrum)
 - odprašování stěn termojaderného fúzního reaktoru a kontaminace paliva
1. Přímý proces nastává většinou pro velké úhly dopadu a pro případ, kdy je materiál vystaven toku lehkých iontů. K vyražení atomu z povrchu terče dochází po jediné srážce s dopadající částicí.



Obrázek 8.2: Příklad zasíťování pouze ve dvou hladinách. Nyní (2010) se používá zasíťování až v 10 hladinách.

2. Nepřímý proces nastává, dopadá-li relativně těžká částice, která předá svoji energii oblasti blízko povrchu a dochází ke vzniku srážkové kaskády, při které může být emitovaný atom z povrchu. Dopadá-li relativně lehká částice, při srážce s povrchovým atomem, nemůže předat dostatečnou energii pro vznik srážkové kaskády.



Obrázek 8.3: Schéma procesů probíhajících po dopadu iontu na povrch materiálu (kolizní kaskáda, vyražení sekundárního elektronu, ...)

Výtěžnost naprašování

$$f = \frac{\text{množství vyražených částic}}{\text{množství dopadajících částic}} \quad (8.1)$$

kde dopadající částice mohou být atomy, iontu, elektrony, atd.

8.2.1 Vliv energie dopadající částice:

- Nízká energie $0 < E < 20 - 50 \text{ eV}$
 - subthreshold (podprahový režim)
 - sputtering yield $\sim 10^{-6}$
 - bylo experimentálně prokázáno, že i částice s velice nízkou energií $< 1 \text{ eV}$ (menší než energie vazby) dokáží vyrazit povrchový atom
- Střední energie $50 \text{ eV} < E < 1 \text{ keV}$
 - “knock-on sputtering regime” – kulečnickový režim. Řetězec srážek (kolizní kaskáda), který vyústí v odprášení atomů z povrchu terče.
 - simuluje TRIM program
 - záleží na: hmotnosti dopadající částice, hmotnosti částice tvořící terč, úhlu dopadu, čistotě terče
 - nezáleží na teplotě terče
- Velká energie $1 \text{ keV} < E < 50 \text{ keV}$
 - nejlépe teoreticky popsána oblast
 - prakticky se pro magnetronové naprašování tato oblast energií nepoužívá

- původní částice způsobí tak velkou kaskádu, že v určité oblasti se potrhají všechny vazby a atomy se uvolní
- Velmi velké energie $E > 50 \text{ keV}$
 - atom proniká velmi hluboko do materiálu beze srážek
 - první srážka se děje hluboko pod povrchem a tedy většinou její účinky neproniknou na povrch
 - implantace, dopování v polovodičovém průmyslu

8.2.2 Výpočet výtěžnosti rozprašování:

$$f(E) = 0,042 \frac{Q(E)\alpha(M_2, M_1)}{U_s} \frac{S_n(E)}{1 + \Gamma k_e \epsilon^{0,3}} \left[1 - \sqrt{\frac{E_{th}}{E}} \right]^s, \quad (8.2)$$

kde E je energie projektilu, M_1 a M_2 jsou hmotnosti projektilu a atomu terče v a.m.u., U_s je povrchová vazebná energie terče, $W(Z_2)$, $Q(Z_2)$ a s jsou bezrozměrné tabulkové parametry. Parametry Γ a $\alpha(M_2, M_1)$ jsou definovány jako

$$\Gamma = \frac{W(Z_2)}{1 + (M_1/7)^3} \quad (8.3)$$

a

$$\alpha(M_2, M_1) = \begin{cases} 0,249 \left(\frac{M_2}{M_1}\right)^{0,56} + 0,0035 \left(\frac{M_2}{M_1}\right)^{1,5} & \text{pro } M_1 \leq M_2 \\ 0,0875 \left(\frac{M_2}{M_1}\right)^{-0,15} + 0,165 \left(\frac{M_2}{M_1}\right) & \text{pro } M_1 \geq M_2 \end{cases} . \quad (8.4)$$

Další použité parametry jsou:

Minimální energie pro rozprašování

$$E_{th} = \begin{cases} 6.7U_s/\gamma, & \text{pro } M_1 \leq M_2 \\ (1 + 5.7(M_1/M_2))/\gamma, & \text{pro } M_1 \geq M_2 \end{cases} \quad (8.5)$$

Energetický faktor pro elastickou srážku

$$\gamma = 4M_1M_2/(M_1 + M_2)^2. \quad (8.6)$$

Lindhartův koeficient pro elektronové zastavování

$$k_e = 0.079 \frac{(M_1 + M_2)^{\frac{3}{2}}}{M_1^{\frac{2}{3}} M_2^{\frac{1}{2}}} \frac{Z_1^{\frac{2}{3}} Z_2^{\frac{1}{2}}}{\left(Z_1^{\frac{2}{3}} + Z_2^{\frac{2}{3}}\right)^{\frac{3}{4}}} \quad (8.7)$$

Účinný průřez pro jaderné brzdění

$$S_n(E) = \frac{84.78Z_1Z_2}{(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{1/2}} \frac{M_1}{M_1 + M_2} s_n^{TF}(\epsilon) \quad (8.8)$$

Redukovaný brzdny účinek

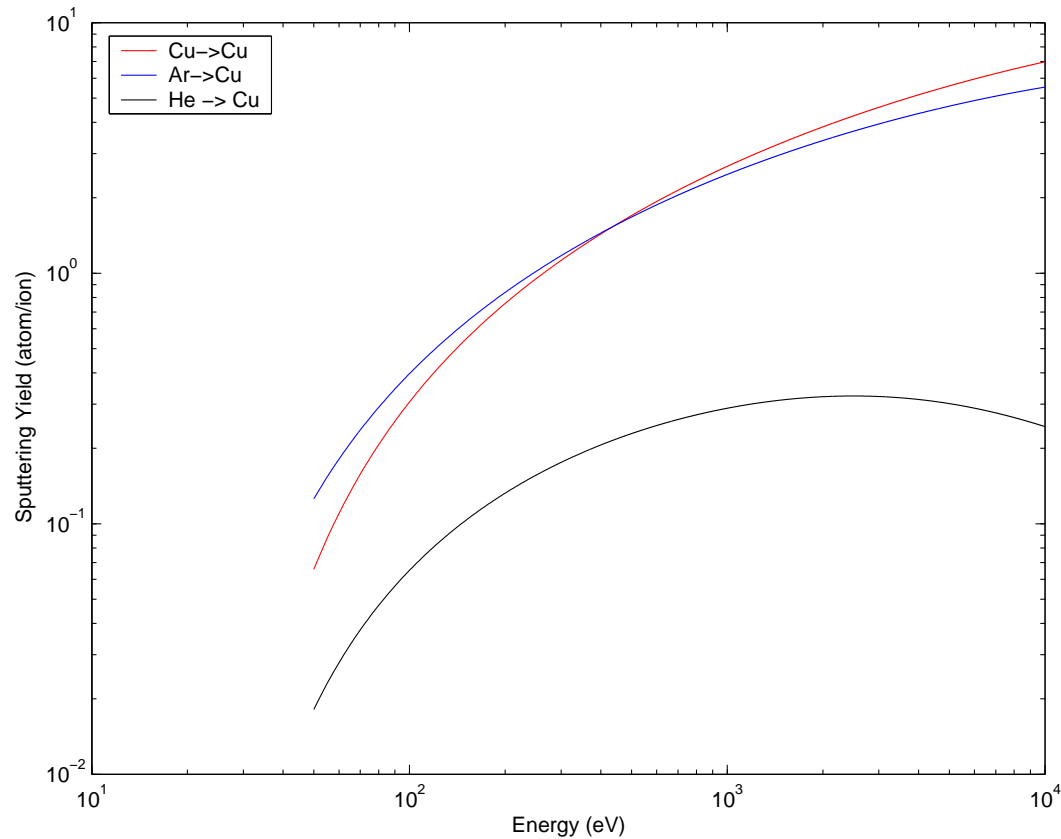
$$s_n^{TF}(\epsilon) = \frac{3.441\sqrt{\epsilon} \ln(\epsilon + 2.718)}{1 + 6.355\sqrt{\epsilon} + \epsilon(6.882\sqrt{\epsilon} - 1.708)}. \quad (8.9)$$

Redukovaná energie

$$\epsilon = \frac{0.03255}{Z_1 Z_2 (Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{1/2}} \frac{M_2}{M_1 + M_2} E(\text{eV}). \quad (8.10)$$

8.2.3 Vliv úhlu dopadu na výtěžnost rozprašování:

- při kolmém dopadu si lze oblast, kam dopadající částice předá svou energii představit jako kouli, jejíž pouze malá část dosáhne k povrchu, z kterého lze uvolnit rozprášenou částici
- pro ostřejší úhly se zasažená oblast přesouvá blíže k povrchu a výtěžnost roste
- pro velmi velké úhly se částice od povrchu terče spíše odrazí
- velké úhly nemají praktické využití, v plazmatu dopadají ionty na povrch katody kolmo



Obrázek 8.4: Závislost výtěžnosti naprašování na energii dopadající částice na povrch mědi.

8.3 Vlastnosti rozprášených částic

8.3.1 Energie a směr rozprášených částic:

- při magnetronovém naprašování se rozprašují atomy, maximálně malé clustery

- je-li povrch pokryt oxidem či nitridem, i v tomto případě se rozprašování děje na atomární úrovni
- závislost množství rozprášených částic na energii je rozdělovací funkce, jejíž integrál odpovídá výtěžnosti naprašování
- maximum rozdělení energie rozprášených částic $\sim 1\text{--}5\text{ eV}$
- střední energie rozprášených částic $\sim 10\text{--}20\text{ eV}$. Pokud by částice s touto energií (beze srážky) dopadly na substrát, budou velkou měrou přispívat k jeho zahřívání. Dále je třeba uvažovat sublimační energii, která je ale stejná u všech PVD procesů a iontový bombard rostoucí vrstvy.
- pro velké energie (ocas rozdělení) platí Thompsonova formule $f(E)dE \sim \frac{E}{(E+E_{\text{vazebné}})^3}dE$

Prostorové rozložení rozprášených částic

- je-li srážková kaskáda náležitě rozvinutá, pro kolmé dopady energetické částice na povrch lze očekávat rozdělení kosinového typu
- tok iontů při plazmovém odprašování téměř neovlivňuje rozložení rozprášených částic (v sheathu nedochází ke srážkám ion–rozprášená částice)

Situace, je-li rozprašován terč tvořený sloučeninou (několika prvky), dochází k rychlému usta-

vení dynamické rovnováhy, kdy složení povrchu terče se liší od složení objemového, ale tok rozprášených částic odpovídá složení terče

- preferenční rozprašování
- srážkové mixování

8.3.2 Transport rozprášených částic:

- rozprášená částice s energií $\sim 10\text{ eV}$ (rychlost $\sim 10\text{ km/s}$) může dopadnout na substrát buď beze srážky (balistický transport), či jen po absolvování několika, či mnoha srážek (difúzní transport)
- hlavní parametr určující typ transportu je koncentrace částic v prostoru mezi terčem a substrátem (tlak). Tlak 1 Pa odpovídá řádově střední volné dráze rozprášených částic několik cm. Je-li vzdálenost terč – substrát cca 5 cm pak balistický transport nastává pro $p < 1\text{ Pa}$ a difúzní transport pro $p > 5\text{ Pa}$.
- tlak je tedy parametr umožňující kontrolu energie dodávané rostoucí vrstvě skrze rozprášené částice a tedy i vlastnosti vrstev

Balistický transport

- částice je po rozprášení transportována prakticky beze srážky. Částice mohou mít kinetickou energii 10 eV i více. Dochází k implantování částice do povrchové vrstvy

rostoucího materiálu. Vznikají defekty u krystalického materiálu, případně lokální natavení materiálu.

- velký bombard vede na hutné vrstvy s malými zrny
- podmínky růstu jsou jiné, než u “termálních” metod. Lze tedy připravit i ne zcela běžné materiály, které při termální depozici by byly nestabilní
- směrovost depozice je velmi dobrá, lze ještě zlepšit filtrováním

Difúzní transport

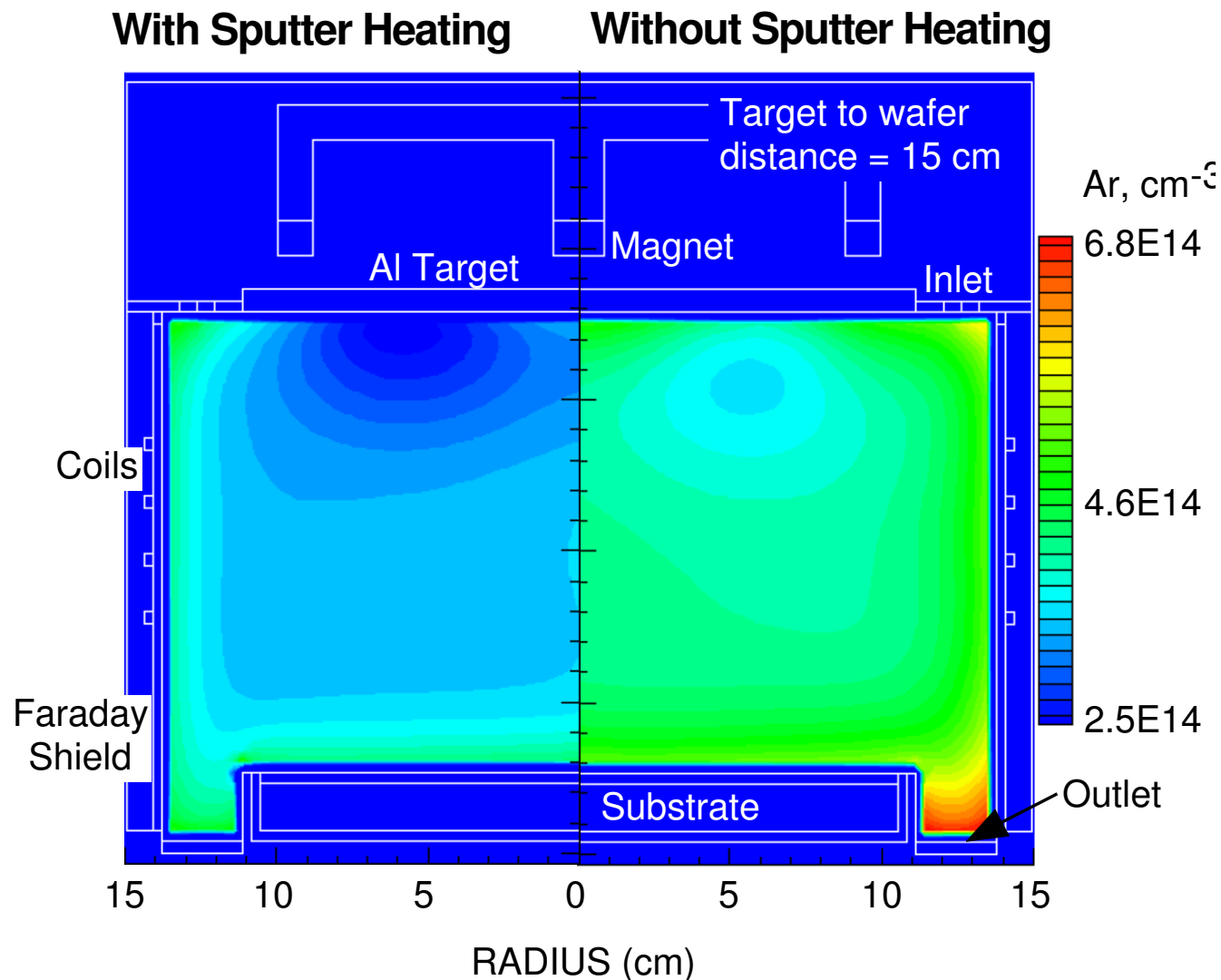
- srážky v průběhu transportu vedou k ochlazování rozprášených částic a zahřívání pracovního plynu
- účinný průřez pro přenos hybnosti je závislý na energii částice. Řádově částice s energií 1 eV je “dvakrát větší”, než částice s energií 10 eV. Čím více srážek, tím je pravděpodobnost další srážky větší (pomaleji se pohybující částice mají více času aby jejich elektronové obaly vzájemně interagovaly)
- vrstva roste z částic, jejichž energie je malá – vrstvy rostoucí z rozprášených atomů za vyššího tlaku jsou jako napařené → velká zrna, lze připravovat jen stabilní materiály
- ztrátový proces

1. redepozice – jednou rozprášený atom se při difúzním transportu může

vrátit na katodu, kde jsou ale oblasti, které se nerozprašují.

2. snižuje se pravděpodobnost, že rozprášená částice dopadne na substrát, který bývá umístěný naproti terči. Zvyšuje se naopak pravděpodobnost, že rozprášená částice dopadne na stěnu (ztráta částice a nutné časté čištění aparatury, okének, atd.)

- rychlost depozice řádově nm/s
- gas rarefaction (ředění plynu) při magnetronovém naprašování (sputtering wind)
 - paralelní proces k ochlazování rozprášených částic
 - ředění plynu (snižování koncentrace v místech, kde dochází k předávání energie) – atomy pracovního plynu jsou zahřívány srážkami s rozprášenými částicemi a zvýšení jejich teploty vede k poklesu jejich koncentrace.
 - pro obvyklé podmínky je v blízkosti katody pracovní plyn zředěn $\sim 5\times$
 - problém při škálování – více rozprašovaný terč \rightarrow více ředění \rightarrow efektivně jakoby byl nižší tlak



Obrázek 8.5: Model zobrazující rozložení koncentrace pracovního plynu v depoziční komoře uvažující a nebo zanedbávající efekt ředění plynu vlivem srážek s rozprášenými částicemi

8.4 Systémy využívající plazma

8.4.1 Fyzikální základy:

Plazma – částečně ionizovaný plyn (přítomnost elektronů a iontů), který splňuje určitá kritéria (např. kvazineutralita, kolektivní chování) Tyto ionty z plazmatu lze využít k bombardování terče a jeho rozprašování (Ar, Ne, Xe, Kr – inertní plyny, případně v kombinaci s reaktivním plynem). Ionizační stupeň pro průmysl použitelného plazmatu je malý: 1 ion na 100–10000 atomů.

Používané jednotky

- $eV = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
- $10^{15} \text{ atomů/cm}^3 = 30 \text{ mTorr} = 4 \text{ Pa}$
- $760 \text{ Torr} = 1 \text{ atmosféra}$
- AMU – Atomic Mass Unit (v periodické tabulce)

Obvyklé parametry naprašování:

- elektroda \sim desítky cm až metry
- tlak 0,01 Pa – 10 Pa, lze i 0 Pa – self-sputtering (samoodprašování terče, samonaprašování vrstvy)
- vzdálenost substrát – terč \sim jednotky až desítky cm

- turbomolekulární vývěvy, suché vývěvy

Udržení výboje:

- sekundární emisí (dopadem iontu) se vyráží elektron \rightarrow ten je urychlován od katody k anodě a ionizuje pracovní plyn
- γ pravděpodobnost sekundární emise
- 1 elektron musí vytvořit minimálně $1/\gamma$ nových elektron-iontových párů (ztráty difúze, rekombinace)
- γ závisí na typu materiálu i energii dopadajícího iontu
- v rozmezí energií vhodných pro naprašování je $\gamma = f(E)$ lineární
- kontaminace, zejména oxidace povrchu, mění γ o 20-100%

Vznik sheathů u povrchu katody i anody díky faktu, že plazma je vodivé a tedy vývoj potenciálu v něm musí být malý. Pokles potenciálu se tedy děje tedy jen u elektrod.

Při naprašování je anodou obvykle celý reaktor vyjma katody. Z bezpečnostních důvodů je uzemněn. Na katodě je napětí v řádu stovek voltů. U katody je velký vývoj potenciálu \rightarrow urychluje ionty z plazmatu.

Pro magnetronové naprašování je klíčové vědět, jaké velké množství elektronů a iontů lze

	Ar, 100 eV	Ar, 1 keV
Ag	0,05	0,07
Cu	0,05	0,30
Mo	0,07	0,10
W	0,01	0,10
Si (100)	0,03	0,04
Si (111)	0,04	0,7

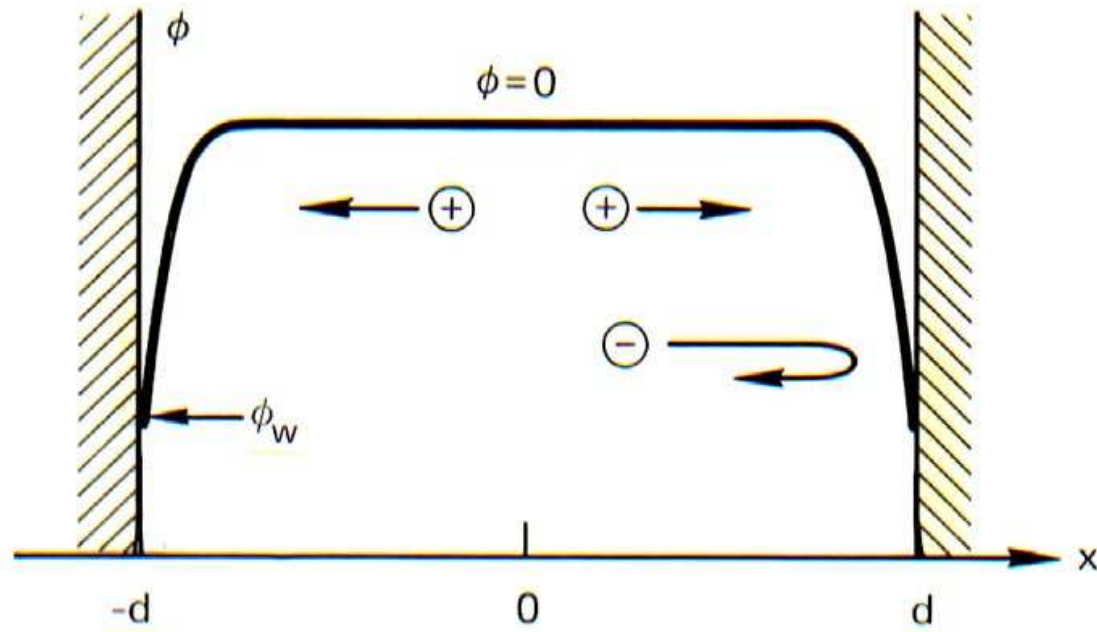
Tabulka 8.1: Příklady koeficientů sekundární emise

vytahovat z plazmatu. Zcela jistě bude existovat určitý limit daný schopností plazmatu se přeskupovat a jeho koncentrací.

Bohm tuto otázku vyřešil ve 40. letech 20. století a zjistil (odvodil), že

$$j = 0,6n_e \sqrt{\frac{kT_e}{M}} j \left[\frac{\text{mA}}{\text{cm}^2} \right] = 8,9 \cdot 10^{-11} n_e \sqrt{\frac{T_e [\text{eV}]}{W [\text{AMU}]} } \quad (8.11)$$

Příklad: chceme-li slušnou depoziční rychlost naprašování, je třeba, aby terčem o 100 cm^2 (5,6 cm poloměr) tekla proud 1 A. otázkou je, jak husté plazma je třeba generovat?



Obrázek 8.6: Typický průběh potenciálu v depozičním reaktoru. a) sheath v blízkosti katody, b) kladný potenciál v plazmatu, který balancuje kvazineutralitu (elektrony jsou pohyblivější, jejich ztrátu na anodu, která je zemněná je třeba brzdit), c) sheath u anody

$$j = 10 \text{ mA/cm}^2 T_e = 3 \text{ eV} W = 40(\text{argon}) n_e = 4 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3} \quad (8.12)$$

Takto velkou koncentraci elektronů není jednoduché zajistit, např. klasickým doutnavým

výbojem. Jde to jen v podmínkách blízkých optimu zapálení a udržení výboje, to jest ale pro tlak stovky pascalů \rightarrow nevhodný tlak pro naprašování \rightarrow snížím tlak \rightarrow mnoho sekundárních elektronů při své cestě a anodě nevyrobí dostatek e-I párů \rightarrow zvýším napětí \rightarrow zvětším množství sekundárních elektronů, ale vzhledem k maximu účinného průřezu pro energii ~ 100 eV zase snížím pravděpodobnost srážky. Ve výsledku jsem si vůbec nepomohl. Tento požadavek tedy klasickým stejnosměrným výbojem za nízkého tlaku nelze zajistit.

Klasifikujme problém: Za nízkého tlaku, který je vhodný pro balistický transport rozprášených částic je střední volná dráha sekundárních elektronů velká.

Hledám řešení, které

- bude fungovat za nízkého tlaku
- zajistí sekundárním elektronům lepší účinnost ionizace
- neovlivní ionty dopadající na katodu
- neovlivní rozprášené částice

Řešením je využít magnetické pole o vhodné konfiguraci, které bude fungovat jako past zachycující sekundární elektrony.

Lorentzova síla $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$. Je-li $B \perp v$, částice je nucena obíhat po kružnici a obíhá tak kolem magnetické siločáry a její pravděpodobnost srážky zůstává stejná, avšak čas po který zůstane

v plazmatu roste. Takto uvězněný elektron vytvoří za cestu mezi katodou a anodou více e-I párů.

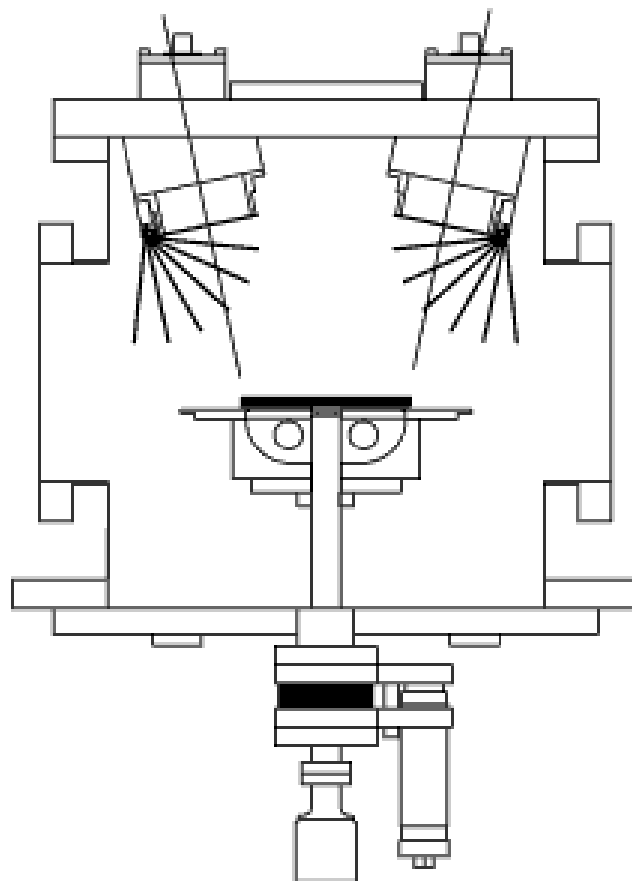
$$r = \frac{mv}{eB} \qquad \omega = \frac{eB}{m} \qquad (8.13)$$

- 100 eV elektron, 100 gauss (0,01 T) $\rightarrow r = 3$ mm
- 100 eV Ar⁺, 100 gauss $\rightarrow r = 66$ cm (magnetické pole prakticky neovlivňuje dráhu iontů dopadajících na katodu)
- elektron v $B = 5$ gauss $\rightarrow f = 13,5$ MHz
- elektron v $B = 875$ gauss $\rightarrow f = 2,45$ GHz

8.4.2 Realizace v praxi:

3 konfigurace

1. magnetické indukční čáry směřují od katody k anodě – dráha sekundárních elektronů je zakřivena. Efektivně se zvýší vzdálenost katoda – anoda
2. zařízení využívající $E \times B$ drift. Nevýhodou je, že u těchto zařízení pozorujeme hromadění náboje na jedné straně zařízení, tedy takzvaný Hallův efekt. Řešení je udělat pomoci 4 cívek vhodně sfázovaných rotující magnetické pole.



Obrázek 8.7: Schéma zařízení pro magnetronové naprašování – dva terče jsou současně odprašovány na substrát.

3. magnetronová konfigurace. Smyčka, která pro dobře navržený magnetron zajistí, že elektrony se otočí nad katodou cca 10krát a i po opuštění oblasti sheathu se

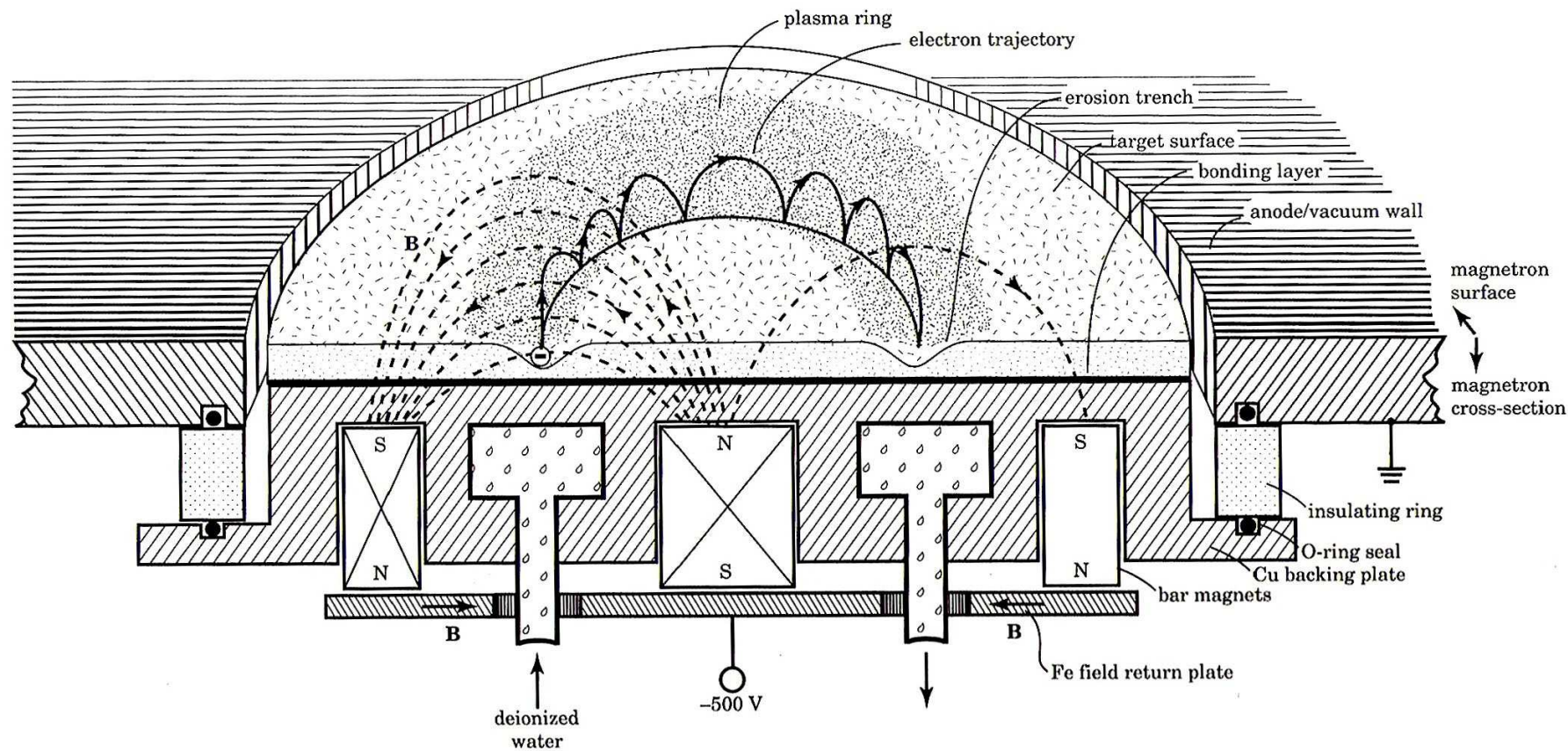
budou nacházet v magnetickém poli, což jejich uvěznění posílí. U magnetronu nejme limitováni na kruhové elektrody.

technické řešení magnetronové konfigurace (cca od roku 1970 zhruba stejné)

- DC, nebo RF výboj zhuštěný přítomností magnetického pole tak, že z něj lze vytažovat dostatečné množství Ar^+ pro rozprašování katody
- elektrony jsou uvězněny $\vec{E} \times \vec{B}$, \vec{B} polem
- ionty nejsou téměř vůbec ovlivněny

Schéma rovinného magnetronu

- lze kruhový, obdélníkový, lichoběžníkový, atd
- magnetické pole je pro kruhový magnetron vytvořené prstencem permanentního magnetu umístěným kolem centrálního magnetu. Centrální magnet a prstenec mají opačnou orientaci pólů
- zespodu plát materiálu (železo) s velkou permeabilitou, který stíní spodní část od účinků magnetického pole
- lze místo permanentních magnetů použít i elektromagnety (výhody – lze pole měnit, nevýhody – hřeje, hrozí nebezpečí zkratu, hmotnost, objem)
- oblasti eroze se říká racetrack



Obrázek 8.8: Schéma rovinného magnetronu

- magnetronová konfigurace působí erozi jen někde, tedy materiál není rozprašován rovnoměrně podél terče. Navíc jak se materiál rozprašuje, mění se velikost magnetického pole, hustota plazmatu a tedy mírně i tok rozprášených částic. Nerov-

noměrné rozprašování terče bývá řešeno rotací magnetů vhodného tvaru.

Vliv konfigurace magnetického pole na provoz magnetonu – konfigurace

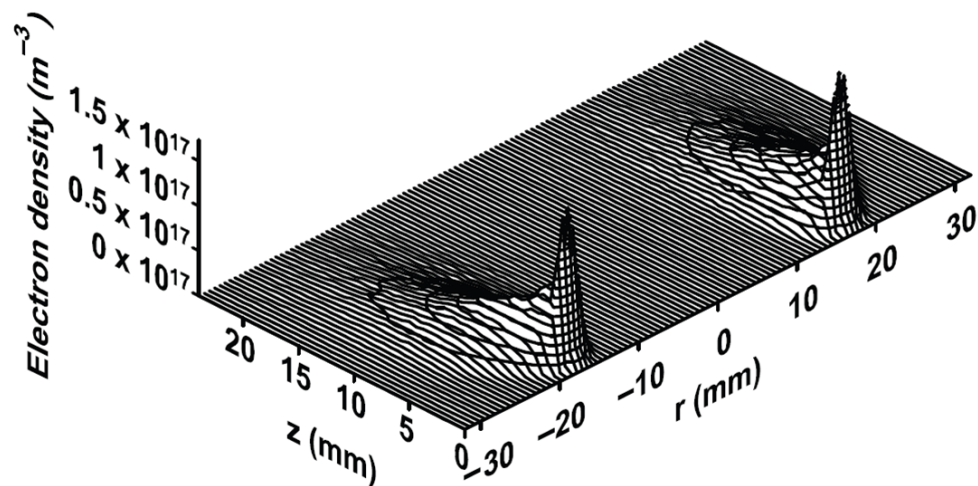
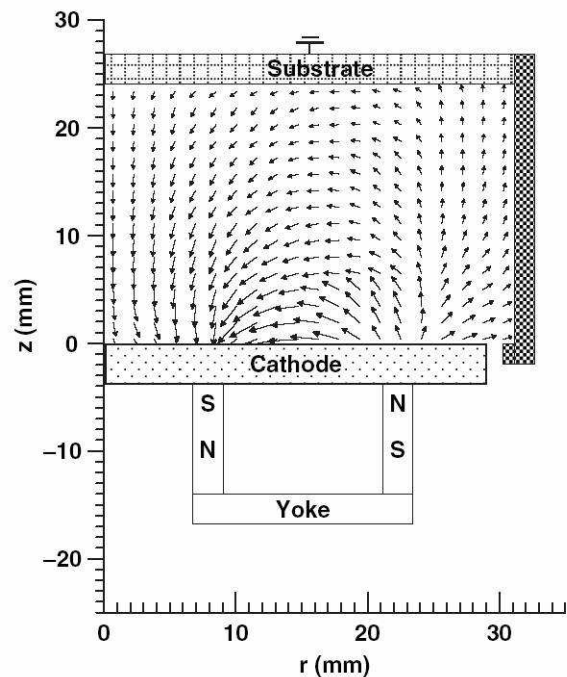
- elektrony jsou uvězněny magnetickým polem, což umožňuje zvýšit n_e a snížit p
- nevýhodou magnetické pasti je velmi malá hustota iontů u substrátu a tedy i nízký bombard rostoucí vrstvy ionty z plazmatu (kvazineutralita plazmatu). Pro otěruvzdorné a tvrdé vrstvy je třeba snížit vyváženost magnetického pole
- v mikroelektronice je tlak $\sim 0,1$ Pa stále velký, je tedy třeba dbát na použití extrémě dobře vyváženého magnetického pole

Silně vyvážené magnetické pole (nízkotlaké naprašování)

- vytvoření dalšího magnetického pole, které funguje jako přídavná bariera pohybu elektronů směrem k anodě
- u silně vyvážených konfigurací magnetického pole bývá tok iontů na substrát $< 1 \text{ mA/m}^2$

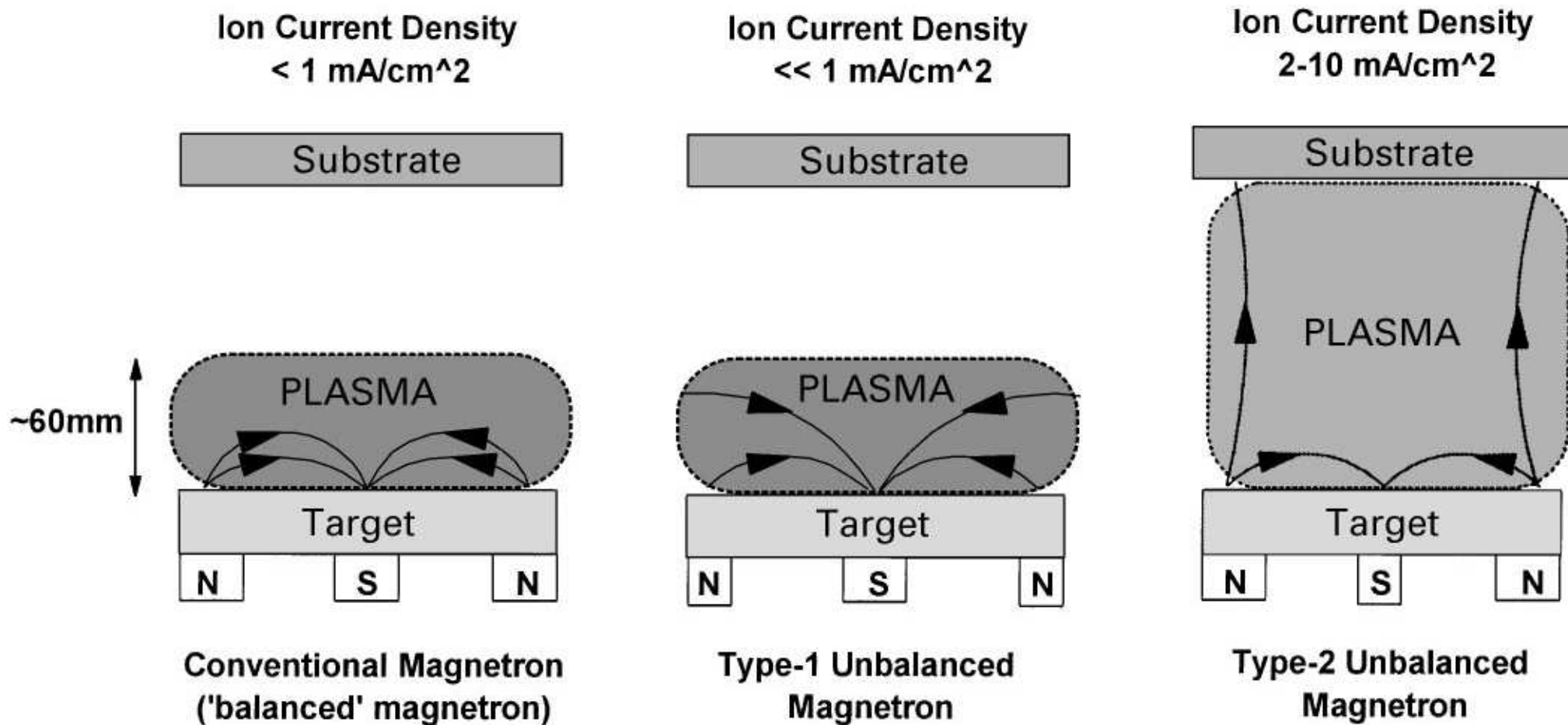
Nevyvážené magnetické pole (zvýšení toku iontů na substrát)

- nevyvážená konfigurace magnetického pole vznikne posílením vnějších magnetů
- v této konfiguraci hustota toku iontů na substrát je typicky $2\text{--}10 \text{ mA/m}^2$



Obrázek 8.9: Typické vyvážené magnetické pole a prostorové rozložení hustoty plazmatu, kde je dobře partná oblast racetracku.

- zvýším-li proud magnetronem, zvýší se tok iontů, ale poměr toku iontů ku neutrálům na substrát bude konstantní
- posílením vnitřního magnetu naopak snižuje bombardování vrstvy ionty, ale ne zvyšujeme vyváženost magnetického pole



Obrázek 8.10: Schéma základních typů magnetického pole.

Při použití více terčů se využívá tzv. closed-field konfigurace magnetického pole pro zvýšení toku iontů a homogenizaci depozice. Ztráty elektronů a iontů na stěny jsou velmi nízké a substrát leží v oblasti relativně vysoké koncentrace iontů ($3\times$ více, než u unbalanced mag-

netronu). Zvyšují-li vzdálenost terčů od substrátu, podíl toku iontu na substrát ku toku neutrálních částic se zvyšuje (neutrály se ztrácí rychleji).