

Segulspætur

Jón Tómas Guðmundsson

Raunvísindastofnun Háskólans,
Dunhaga 3, IS-107 Reykjavík

tumi@hi.is

31. janúar 2002

1

Spætun

- Spætun er víða notuð við ræktun þunnra húða sem hafa nýja efnis- eða yfirborðseiginleika
- Dæmi um slíkar húðir eru
 - Í smárásam (e. integrated circuits)
 - Segulefni
 - Harðar húðir
 - Núningsfletir
 - Húðir fyrir ljóstækni (e. optical coating)
 - Skrauthúðir
 - Slitþolnar húðir
 - Tæringarvörn

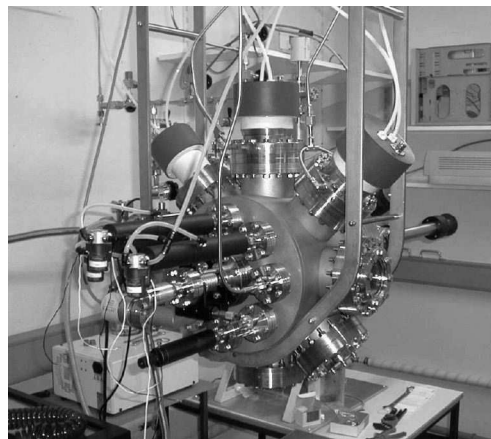
3

Yfirlit

- Almenn um spætun
- Almenn um rafgas
- Kennistærðir rafgass
- dc spætur
- Segulspætur
- Endurbætur á segulspætutækni
- Púlsuð segulspæta
- Samantekt

2

Spætun



- Segulspætur gegna veigamiklu hlutverki í framleiðslu þunnra húða
- Myndin sýnir segulspætu á Raunvísindastofnun Háskólans

4

Rafgas

- Rafgas er hlut- eða full jónað gas sem inniheldur rafeindir, jónir, hlutlausar frumeindir og sameindir
- Í hlutjónuðu rafgasi eru rafeindir, sameindir og jónir almennt ekki í varmajafnvægi

Rafgasefnafræðin getur verið flókin

Argon rafgas samanstendur af

e, Ar, Ar⁺, Ar*,...

Súrefnisrafgas samanstendur af

e, O, O₂, O₂⁺, O⁺, O₂⁻, O⁻, O₂^{*}, O*,

SF₆ rafgas samanstendur af

e, SF₆, SF₅⁺, SF₄⁺, SF₃⁺, F⁺, F⁻, F*, F₂, F,....

5

Kennistærðir rafgass

Gefnar stýristærðirnar

- Gasþrýstingur p
- Afl P_{abs} eða katóðuspenna V_{target}
- Stærð afhleðslunnar R og L

Þá fýsir okkur að vita

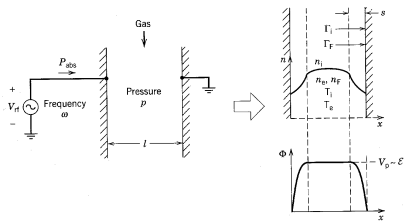
- Flæði jóna og atóma til undirlags, Γ_i, Γ_n
- Orkudreifingu jóna og stefnu $f(\mathcal{E}_i)$
- Orkudreifingu rafeinda $f(\mathcal{E}_e)$

7

Kennistærðir rafgass

Rafgasið hefur eftirfarandi eiginleika (kennistærðir)

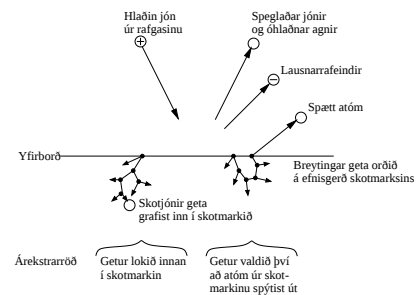
- **Rafeindabéttleiki** n_e og jónabéttleiki n_i
- **Refeindahitastig** T_e er mælikvarði á meðalorku rafeinda í gasinu
- Rafgas, sem er nærhlutlaust ($n_i \approx n_e$), tengist yfirborðum um jákvætt hlaðið lag, nefnt slíður (e. sheath) af þykkt s
- Á milli rafgasbolsins og yfirborðsins myndast mætti, **rafgasmættið**, V_{pl}



6

dc spæta

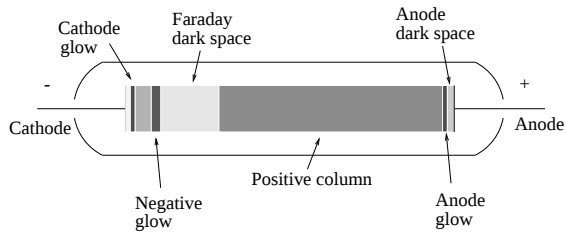
- Spætun var uppgötvuð 1852
- Jón með orku 50 – 1000 eV spætir atóm og losar rafeindir úr skotmarki
- Þetta má gera með því að hraða jón úr rafgasi sem þá er myndað milli tveggja skauta sem á er lögð dc spenna



Mynd [Ólafsson and Arnalds, 1999]

8

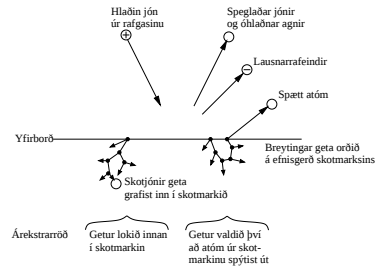
dc spæta



- Dæmigerð dc afhleðsla samanstendur af jákvæðri anóðu og neikvæðri katóðu sem komið er fyrir í löngum lofttæmdum glersívalningi
- Argon er oftast notað sem spætunargas vegna óhvarfgirni þess og hæfilegs massa til spætunar
- Hún vinnur á þrýstingsbilinu 10 mTorr upp í 10 Torr

9

dc spæta

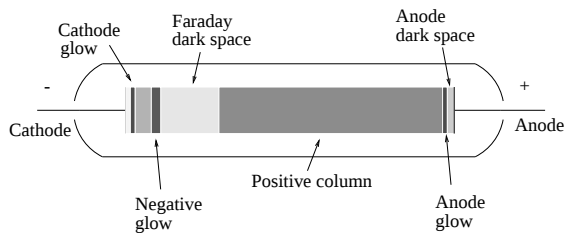


Mynd [Ólafsson and Arnalds, 1999]

- Afhleðslunni er viðhaldið með lausnarrafeindum sem er geislað út frá skotmarkinu við árekstur jóna sem hraðað er yfir slíðrið
- Fyrir hverja argonjón losna 0.1 – 3 lausnarrafeindir frá katóðunni
- Skotmarkinu (katóðunni) er haldið við háa neikvæða spennu og lausnarrafeindunum er hraðað yfir slíðrið með upphafsorku sem samsvarar mættinu yfir slíðrið

11

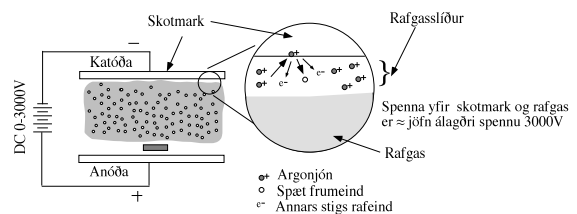
dc spæta



- Til að viðhalda rafgasi þarf spenna á milli skauta að vera nokkur hundruð volt
- Spennan fellur fyrst og fremst yfir slíðursvæðið næst katóðunni
- Rafeindirnar sem bera mest af straumnum í jákvæðu súlunni ná ekki að katóðunni
- Jónirnar eru þungar og geta ekki borið þennan straum

10

dc spæta

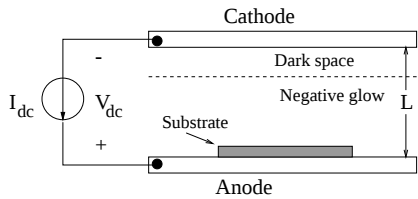


Mynd [Ólafsson and Arnalds, 1999]

- Þessar rafeindir jóna atóm sem aftur er hraðað yfir slíðrið að skotmarkinu og losa þar fleiri lausnarrafeindir
- Straumur byggist upp með jónun innan slíðursins vegna lausnarrafeinda

12

dc spæta



- Dæmigerð útfærsla á dc spætu hefur $L/R \leq 1$ og er sívalningslaga
- Bilið milli katóðu og anóðu er um $L \sim 5$ cm
- Jákvæða súlan er oftast ekki fyrir hendi í svo stuttri afhleðslu og spennan fellur nær öll yfir slórið við katóðuna
- Oftast er notað Ar gas
- Straumi haldið föstum á meðan ræktað er
- Undirlagið, sem ræktað er á, hvílir á anóðunni

13

dc spæta

- Ókostir við dc spætun eru
 - Lítill ræktunarhraði
 - Lítil jónun
 - Mikil upphitun undirlags
- Æskilegt er að láta spætuna vinna við
 - hærri straumbéttleika
 - lægri spennu
 - lægri gasþrýstingen hægt er að fá í dc spætu

15

dc spæta

- Til að mynda þetta húð með ásættanlegum ræktunarhraða (~ 350 Å/min) þarf jónabéttleika ≥ 1 mA/cm²
- Afhleðslan þarf að vinna við $V_{dc} \sim 2 - 5$ kV
- Einnig verður gasþrýstingur að vera nægilega hár til að lausnarrafeindirnar nái ekki að anóðunni eða að jarðtengdum yfirborðum
- Þessi gasþrýstingur er hærri en heppilegt er til ræktunar með spættu atómum vegna dreifingar frá atómum gassins
- Það er því á þröngu þrýstingsbili umhverfis 30 mTorr sem dc spætun er nothæf

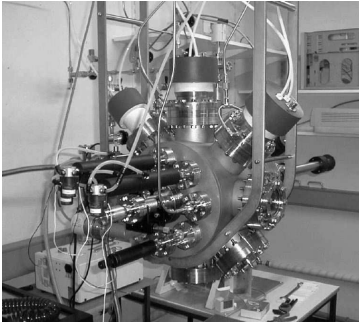
14

Segulspæta

- Segulspætan var þróuð til að auka spætun og þar með ræktunarhraða
- Í segulspætu er þéttu rafgasi haldið við katóðuskaut með segulviði
- Segulvið hremmir orkumiklar jónandi rafeindir nærri katóðunni, sem viðhalda rafgasinu
- Jónahríð frá rafgasinu spætir atóm frá katóðuskotmarki og spættar agnir falla á yfirborð og mynda húð
- Skotmarkið er umlukið þéttu rafgasi en undirlagið, sem á er ræktað, situr í veikara rafgasi

16

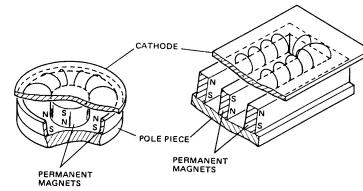
Spætun



- dc segulspætur eru víða notaðar til að mynda málmhúðir úr t.d. áli, gulli, þungasteini og ýmsum melmum
- Þegar rf aflgjafi er tengdur yfir skautin má rækta þunnar oxíð-, nítríð- og keramikhúðir
- Aukin þörf fyrir ný efni og fjöllaga ræktun hafa leitt til þróunar fullkomnari spætukerfa

17

Segulspæta



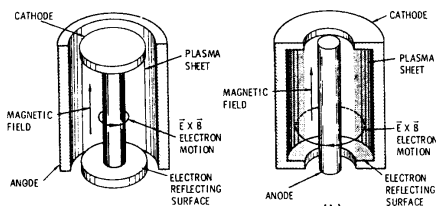
Mynd [Waits, 1978]

- Í flatri segulspætu er katóðan flöt
- Flata segulspætan er mun algengari sem framleiðslutæki
- Venjulega vinnur flöt dc afhleðsla við 1 – 10 mTorr gasþrýsting, segulsvið 0.01 – 0.05 T (100 – 500 Gauss) og áglagða katóðuspennu 300 – 700 V
- Í dæmigerðri dc segulspætu er katóðunni haldið við fasta neikvæða spennu

19

Segulspæta

- Segulspætan getur verið flöt eða sívalningslaga

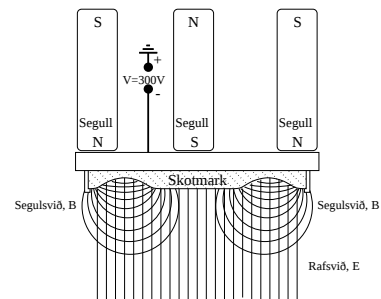


Mynd [Thornton and Penfold, 1978]

- Í sívalningslaga segulspætu eru skautin sammiðja sívalningar og segulstefnan er eftir ás afhleðslunnar
- Ef miðju sívalningurinn er katóðan flæða spættu atómin út eftir radíumum

18

Segulspæta

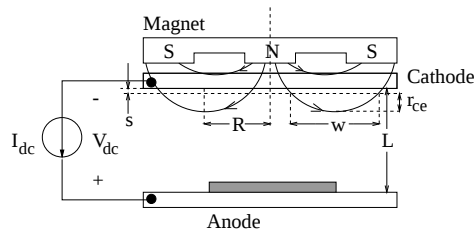


Mynd [Ólafsson and Arnalds, 1999]

- Í segulspætu er dvalartími og brautarlengd rafeindanna í rafgasinu lengdur og þar með fjölgað árekstrum þeirra við gasatóminn
- Þetta er gert með því að koma fyrir sísegli ofan við katóðuna
- Segulsviðið er nærri hornrétt á rafsviðið milli skautanna
- Segulsviðið hremmir lausnarrafeindirnar sem ferðast nú eftir spirallaga brautum

20

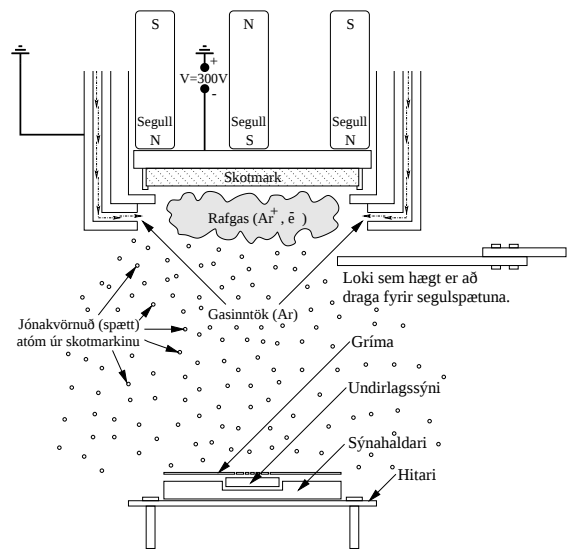
dc afhleðsla



- Dæmigerð flöt ($L/R \leq 1$) segulspæta er sýnd hér að ofan
- Síseglarnir ofan við katóðuna mynda segulsviðslínur sem koma út um mitt katóðuskautið og lokast við jaðra þess
- Segulsviðið hefur aðeins áhrif á rafeindirnar þegar það er af þeim styrk sem gjarnan er notaður í segulspætum
- Rafgasið er myndað ef > 200 V neikvæð spenna er lögð á katóðuna

21

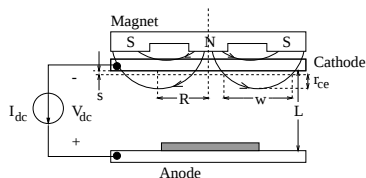
Segulspæta



Mynd [Ólafsson and Arnalds, 1999]

23

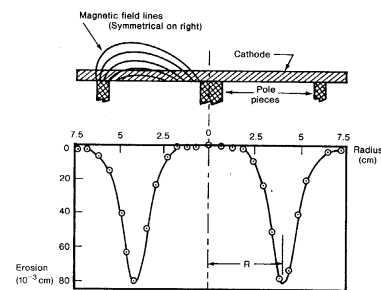
Segulspæta



- Afhleðslan sést sem lýsandi hringur af breidd w og meðalradía R sem hangir neðan við katóðuna
- Í þessum hring er jónabéttleikinn hæstur
- Spætunin á sér stað undir þessum hring
- Rafgasið næst katóðunni hefur háan jónabéttleika ($10^{18} - 10^{19} \text{ m}^{-3}$)
- Í nánd við undirlagið sem ræktað er á er þéttleiki jóna nokkrum stærðargráðum lægri ($10^{15} - 10^{16} \text{ m}^{-3}$)
- Hlutfall málmjóna og atóma er þar tiltölulega lágt

22

Segulspæta



Mynd [Chapin, 1974]

- Staðbundið rof (e. erosion) skotmarksins er afleiðing hins sterka segulsviðs sem situr að baki skotmarksins
- Þetta tiltekna segulsvið gefur rofsnið sem er þannig að aðeins 26 % skotmarksins eru nýttast

24

Segulspæta

- Ræktunarhraðanum er stýrt með affi til katóðu eða spennu milli skauta
- Straum-spennu kennilína fylgir gjarnan

$$I = kV^n$$

þar sem I er straumur til katóðu og V er álögð katóðuspenna

- Því betur sem segulsviðið hremmir rafeindirnar því hærri er veldisvísirinn n
- Veldisvísirinn n liggur á bilinu 5 – 15, hefur lág gildi þegar afhleðslan er við mjög lágan gasþrýsting eða segulsviðið er af lágum styrk
- Í dæmigerðri segulspætu eru katóðuspennan og straumurinn tengdar stærðir
- Aukinn ræktunarhraði þýðir þá að auka verður spennuna á katóðunni til að auka þéttleika rafgassins
- Aukið flæði jóna gefur því aukinn straum

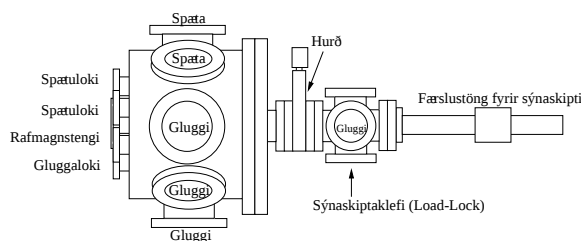
25

Segulspæta - rf

- Ekki er hægt að nota skotmörk úr einangrurum til spætunar í dc segulspætu, þar sem hleðsla safnast upp á þeim
- Þar með lækkar orka þeirra jóna sem lenda á skotmarkinu
- Þetta má hindra með því að nota riðspennu, sem þá er gjarnan á útvarpstíðni, 13.56 MHz
- Í segulspætu er rf spætun umtalsvert hægari en dc spætun
- Jónum er aðeins hraðað til skotmarksins á meðan spennan er neikvæð
- Bindiorka atóma á yfirborði einangrara er hærri en í leiðurum og hærri orku þarf til að losa þau

27

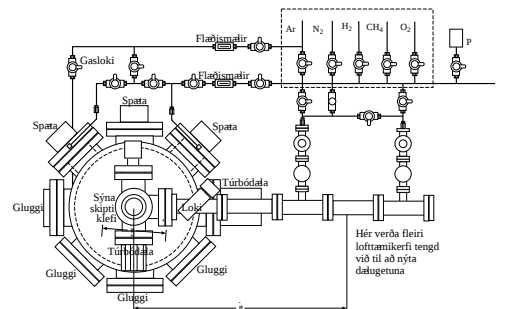
Segulspæta



- Dæmigerðar vinnustærðir fyrir segulspætu
 - $B_0 \sim 200 - 400$ Gauss
 - $p \sim 1 - 5$ mTorr
 - $\bar{J}_i \sim 10 - 50$ mA/cm²
 - $V_{dc} \sim 500 - 1000$ V
 - Ræktunarhraði ~ 2000 Å/min

26

Segulspæta - hvarfaspætun



- Efnasambönd eins og oxíð og nítríð eru ræktuð með hvarfaspætun (e. reactive sputtering) þar sem málmskotmark er spætt í hvarfgjörnu gasi
- Í segulspætu með Al skotmark má þá rækta Al₂O₃ úr Ar/O₂ rafgasi og AlN úr Ar/N₂ rafgasi

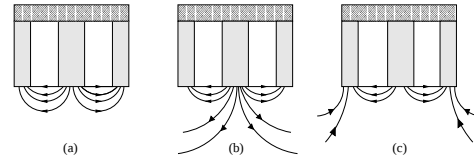
28

Segulspæta

- Gallar á dc segulspætum
 - Léleg nýting á skotmarki (25 – 30 %) er notað
 - Mengun á skotmarki (myndun einangrandi húðar við hvarfaspætun)
 - Varmaálag á skotmarki
 - Lágur ræktunarhraði þegar ræktaðir eru rafsvavar og segulmögnuð efni
 - Raffræðilegur óstöðugleiki eða ljósbogar (e. arcs)

29

Segulspæta - ójöfnuð



- Ójöfnuð segulspæta (e. unbalanced) var þróuð til þess að auka jónastraum í nágrenni undirlagsins sem ræktað er á
- Í ójafnaðari segulspætu er segulsviðið á ytri hringnum aukið eða minnkað með tilliti til miðjunnar
- Þannig lokast ekki allar segulsviðslínurnar við miðju og ytri póla segulspætunnar og eitthvað af lausnarrafeindunum fylgja þessum sviðslínum
- Rafgasið er þannig ekki aðeins bundið svæðinu næst skotmarkinu heldur er flæðir það í átt að undirlaginu

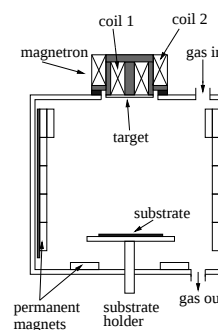
31

Segulspæta

- Sum ofangreindra vandamála má leysa með því að
 - púlsa spennuna
 - auka jónunina
 - breytilegri hremmingu rafeindanna af segulsviðinu
- Nokkrar lausnir á ofangreindum takmörkunum:
 - Ójöfnuð segulspæta
 - Fjölpóla seglar
 - Innri spanspóla
 - Ytri spanspóla
 - Ósamhverf púlsum
 - Háafspúlsum

30

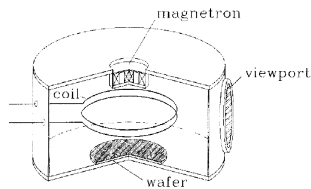
Segulspæta - fjölpóla seglar



- Ein leið til að auka flæði jóna til undirlagsins er að koma fyrir fjölpóla seglum
- Með fjölpóla seglum á veggjum afhleðslunnar má draga úr töpum jóna til veggja
- Með samspili breytilegrar ójöfnunnar getur jónastraumurinn næst undirlaginu verið stýranlegur

32

Segulspæta - innri spanspóla



- Til að auka hlutfall jónunar í nágrenni undirlagsins má setja rf spanspólu á milli katóðu og anóðu
- Hennar hlutverk er að jóna málmatómin sem spætt eru úr skotmarkinu
- Þá má hraða málmjónum að undirlaginu með líttilli neikvæðri spennu, málmjónirnar lenda þá hornrétt á undirlaginu og hafa stýranlega orku
- Jónun málmatómanna getur verið 80 – 90 % við undirlagið

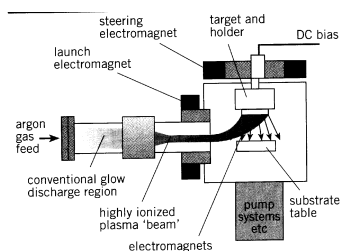
33

Segulspæta – Púlsuð (ósamhverf)

- Vandí er að beita hvarfaspættun í dc segulspætu til að rækta einangrara frá leiðandi skotmarki
- Einangrandi lag vill myndast á yfirborði skotmarksins sem leiðir til ljósbogamyndunar og óstöðugleika
- Hleðsla safnast upp á yfirborði einangrandi húðarinnar og einangrarinn brotnar síðan niður og afleiðingin er að ljósbogi myndast
- Ljósbogamyndun í rafgasinu getur eyðilagt afgjafann og skotmarkið
- Ein lausn á þessu er að beita ósamhverfri púlsun á spennunni til skotmarksins
- Með henni fæst betri og hraðari ræktun á einangrandi húðum

35

Segulspæta - ytri spanspóla



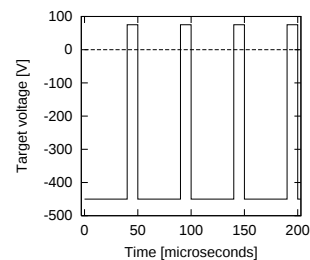
Mynd [Valeron, 2000]

- Rafgas er myndað í sívalningslaga spanafhleðslu (til vinstri á mynd)
- Segullinsur skerpa rafeindirnar í sterkan geisla og beina þeim að skotmarkinu
- Jákvæðum jónum sem myndast í afhleðslunni er hraðað að skotmarkinu af neikvæðu katóðuspennunni

34

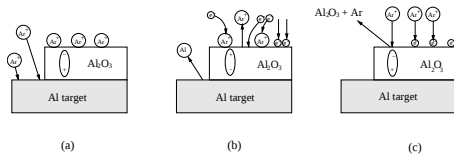
Segulspæta – Púlsuð (ósamhverf)

- Þá er skotmarkið spætt (við - (400 – 500 V)) í tiltekinn “pulse on” tíma
- Þessi tími er takmarkaður við það að hleðslan valdi ekki niðurbroti og ljósboga
- Hleðslunni er síðan eytt við “pulse off” þegar á skotmarkið er lögð jákvæð spenna 50 – 100 V
- Spennan á katóðuna er púlsuð á tíðninni 10 – 250 kHz



36

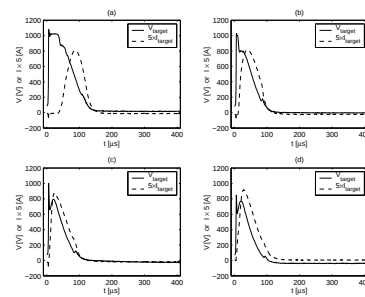
Segulspæta– Púlsuð (ósamhverf)



- Einangrarinn á yfirborði skotmarksins virkar eins og rafsvari í þétti þar sem skotmarkið er annað skautið og rafgasið er hitt
- Þegar einangrandi húð myndast safnast lágorku jónir á yfirborðið og hlaða þéttinn upp í álagða spennu
- Þegar spennan á þéttinn eykst dregur úr orku jóna sem hraðað er að skotmarkinu

37

Segulspæta – púlsuð einpóla

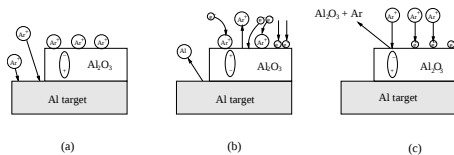


Mynd [Gudmundsson et al., 2002]

- Í dæmigerðri dc segulspætu takmarkast aflþéttleikinn af varmaálagi (e. thermal load) á skotmarkinu, þar sem mest af orku jónanna sem hraðað er að skotmarkinu er breytt í hita
- Í einpóla púlsun er aflgjafinn keyrður á lágu (eða engu) afli og síðan er aflið púlsað í verulega hátt gildi í stuttan tíma

39

Segulspæta– Púlsuð (ósamhverf)



- Þegar jákvæð spenna (75 V) er lögð á skotmarið dragast rafeindir að yfirborði einangrandi lagsins og það hleðst í neikvætt gildi (-75 V)
- Þegar svo spennan á skotmarið er aftur sett neikvæð (-450 V) er jónum hraðað með mættinu -525 V og þær hreinsa þá einangrarann af yfirborðinu

38

Segulspæta – púlsuð einpóla

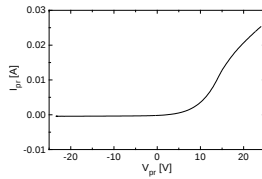
- Hér er lýst tilraun með púlsaða segulspætu
- Aflgjafinn getur gefið púlsa sem eru allt að 2.4 MW
- Þeir eru 100 μ s langir og koma með 50 Hz tíðni
- Við mælum tímahegðan straum spennu kennilínu frá Langmuir nema og finnum kennistærðir rafgassins, rafeindapþéttleika n_e , virkt rafeindahitastig T_{eff} og dc rafgasmætti V_{pl}
- Mælingar voru framkvæmdar á þrýstingsbilinu 0.5 – 20 mTorr, skotmarkið var tantalum og meðalaflið 300 W

40

Langmuirnemi



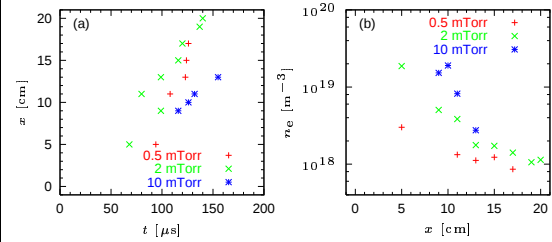
- Einfaldur vír sem stungið er inn í rafgasið



- $I - V$ kennilínan gefur
 - rafeindapétteleika n_e
 - rafeindahitastig T_{eff}
 - rafasmættið V_{pl}
 - orkudreififall rafeindanna (EEDF)

41

Segulspæta -púlsuð einpóla

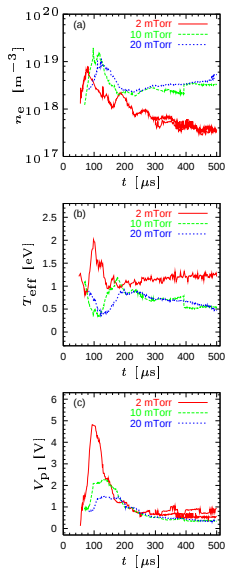


Mynd [Gudmundsson et al., 2002]

- Toppurinn í rafeindapétteleikanum ferðast í átt frá katóðunni með hraðanum
 - 3.2×10^5 cm/s við 0.5 mTorr
 - 1.9×10^5 cm/s við 2 mTorr
 - 1.0×10^5 cm/s við 10 mTorr
- Toppurinn í rafeindapétteleika fellur með minnkandi gasþrýstingi og með fjarlægð frá katóðunni

43

Segulspæta -púlsuð einpóla

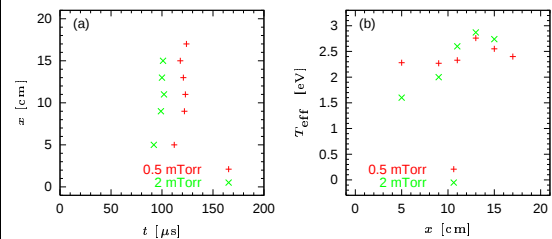


Mynd [Gudmundsson et al., 2002]

- Kennistærðir rafgass 9 cm neðan við skotmark

42

Segulspæta -púlsuð einpóla

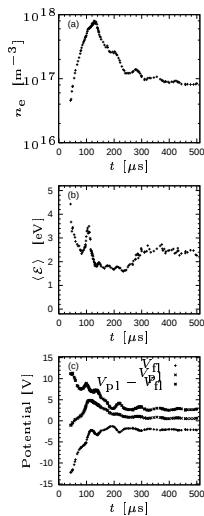


Mynd [Gudmundsson et al., 2002]

- Virkt rafeindahitastig T_{eff} er í hámarki á sama tíma óháð staðsetningu í afhleðslunni
- Sennilega er um að ræða hrinu háhraða rafeinda sem losna við lok púlsins

44

Segulspæta -púlsuð einpóla

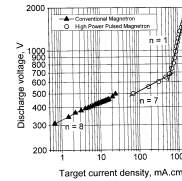


Mynd [Gudmundsson et al., 2001]

- Kennistærðir rafgass 20 cm neðan við skotmark við 2 mTorr

45

Segulspæta

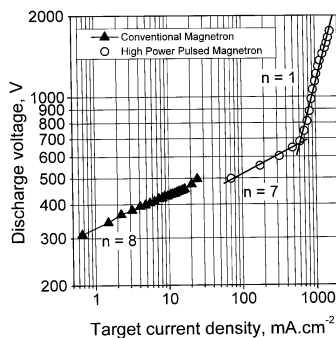


Mynd [Ehiasarian et al., 2002]

- Púlsuð segulspæta sýnir tvenns konar hegðan
 - Við lítinn straumbéttleika $< 600 \text{ mA/cm}^2$ er $n = 7$, sem gefur til kynna eðlilega segulspætuhegðan
 - Við hærri straumbéttleika breytist veldisvísirinn í $n = 1$, þar sem hárri álagðri spennu fylgir ekki veruleg aukning í straumi
- Ein möguleg skýring á þessu er að lausnarrafeindir sem hraðað er við 1600 V er segulviðinu ekki mögulegt að hremma og þar af leiðir að það dregur úr jónun

47

Segulspæta

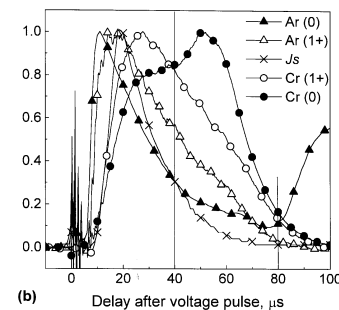


Mynd [Ehiasarian et al., 2002]

- Myndin sýnir $I - V$ kennilínu segulspætu við 3 mTorr
- Fyrir dæmigerða dc afhleðslu er veldisvísirinn $n = 8$

46

Segulspæta

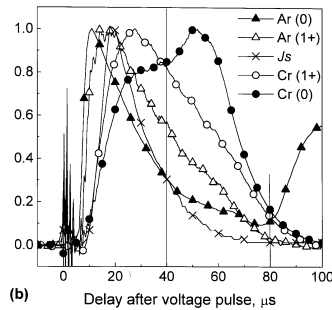


Mynd [Ehiasarian et al., 2002]

- Myndin sýnir ljósútgeislun frá rafgasinu 1 cm neðan við Cr skotmark
- Rafgas af háum þéttleika myndast fyrstu 40 μs
- Fyrst sést útgeislun frá Ar atómum frá bakgrunnsgasinu þegar niðurbrot á sér stað

48

Segulspæta



Mynd [Ehiasarian et al., 2002]

- Þegar Ar jónast eykst þéttleiki rafgassins, jónastraumurinn eykst og ljósútgeislun frá Ar^+ verður áberandi
- Nokkrum μs á eftir Ar^+ toppnum er Cr^+ útgeislun í hámarki, 10 μs eftir að jónastraumurinn er í hámarki

49

Pakkir

- Rannsóknir á púlсадri segulspætu fara fram við Linköpinghaskóla í Svíþjóð í samvinnu við prófessor Ulf Helmersson og doktorsnema hans Jonas Alami
- Ljósmeilingarnar voru framkvæmdar af A. P. Ehiasarian, doktorsnema við Hallam University í Sheffield á Englandi
- Mikið af myndunum voru fengnar frá Unnari B. Arnalds meistaranema í eðlisfræði á Raunvísindastofnun Háskólans
- Uppbygging á segulspætum á Raunvísindastofnun hefur að mestu verið framkvæmd af Sveini Ólafssyni og Unnari B. Arnalds

51

Samantekt

- Fjallað var almennt um spætn
- Segulspætutæknin var kynnt
 - Fjallað um kosti hennar og galla
- Skoðaðar voru endurbætur á segulspætum
 - Kynntar niðurstöður mælinga á háafis púlсадri segulspætu

50

Heimildir

- [Chapin, 1974] Chapin, J. S. (January 1974). The planar magnetron. *Research/Development*, pages 37 – 40.
- [Ehiasarian et al., 2002] Ehiasarian, A. P., New, R., Münz, W.-D., Hultman, L., Helmersson, U., and Kouznetsov, V. (2002). Influence of high power densities on the composition of pulsed magnetron plasmas. *accepted for publication in Vacuum*.
- [Gudmundsson et al., 2001] Gudmundsson, J. T., Alami, J., and Helmersson, U. (2001). Evolution of the electron energy distribution and the plasma parameters in a pulsed magnetron discharge. *Applied Physics Letters*, 78:3427 – 3429.
- [Gudmundsson et al., 2002] Gudmundsson, J. T., Alami, J., and Helmersson, U. (2002). Spatial and temporal behavior of the plasma parameters in a pulsed magnetron discharge. to be submitted to *Surface and Coating Technology*.
- [Ólafsson and Arnalds, 1999] Ólafsson, S. and Arnalds, U. B. (1999). Veikt jónað rafgas: Kennistærðir og notkun. In Ólafsson, A., editor, *Eðlisfræði á Íslandi IX*, pages 143–152. Reykjavík. Eðlisfræðifélag Íslands.
- [Thornton and Penfold, 1978] Thornton, J. A. and Penfold, A. S. (1978). Cylindrical magnetron sputtering. In Vossen, J. L. and Kern, W., editors, *Thin Films Processes*, pages 76 – 113. Academic Press, New York.
- [Valeron, 2000] Valeron, E. (September/October 2000). Sputtering advance reaches the target. *Vacuum Solutions*, pages 23 – 25.
- [Waits, 1978] Waits, R. K. (1978). Planar magnetron sputtering. In Vossen, J. L. and Kern, W., editors, *Thin Films Processes*, pages 131 – 173. Academic Press, New York.

52