

Framleiðsla smárása:

Rafgas

Kaflí 19

Jón Tómas Guðmundsson

tumi@hi.is

12. vika haust 2018

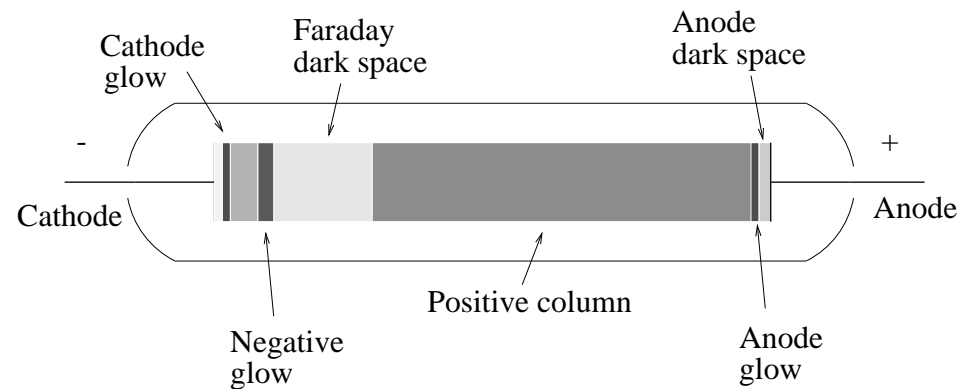
Yfirlit

- Almennt um rafgas
- Hagnýting rafgass
- Kennistærðir rafgass
- Rafgas og afhleðslur
- Kennistærðir rafeinda
- Orkudreifing jóna
- Samantekt

Rafgas

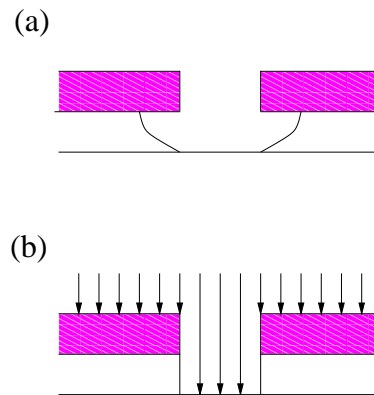
- Rafgas er hlut- eða fulljónað gas sem inniheldur rafeindir, jónir, hlutlausar frumeindir og sameindir
- Full jónað rafgas inniheldur einungis rafeindir og jónir en hlutjónað rafgas inniheldur jafnframt hlutlausar agnir
- Megnið af alheiminum er rafgas
 - Iður stjarna og gufuhvolf þeirra, gaskennd geimþoka og mest af miðgeimsvetninu eru rafgas
 - Í okkar nánasta umhverfi er rafgas notað í flúrperum og neonljósaskiltum og norðurljósín eru rafgas

Rafgas



- Á fyrri hluta 20. aldar var skoðuð á tilraunastofum leiðni og niðurbrot í gasi, útgeislun rafeinda og örvun frumeinda og sameinda með árekstrum við rafeindir.
- Á síðari hluta aldarinnar hefur rafgas verið notað sem ljósgjafar, leysar og í efnisframleiðslu, einkum í rafeindaiðnaði.
- Nú á dögum gegna rafgös veigamiklu hlutverki í framleiðslu smárása.

Rafgas



- Rafgas úr sameindagösum og blöndum þeirra gegna lykilhlutverki í ætingu og ræktun þunnra húða við framleiðslu smárása
- Þannig er súrefnisrafgas notað til að fjarlægja ljósviðnámslag og til oxunar og ræktunar á þunnum oxíðum og kísill er ættur í rafgösum sem innihalda flúor og klór
- Notkun rafgasa er eina færri leiðin til að æta út þau smágerðu hálfleiðaratól sem í dag eru ráðandi í nútíma rafeindatækni

Rafgas

- Til að framkalla megi kjarnasamruna þarf að yfirvinna fráhrindikrafta milli agna
- Þar eð hreyfing samsvarar varma, þá er kjarnasamruni líklegri ef agnirnar (eldsneytið) eru við mjög hátt hitastig - milljónir stiga á Kelvin
- Við slíkan hita er eldsneytið fulljónað rafgas
- Til að viðhalda þessum mikla hita má gasblandan ekki komast í snertingu við yfirborð eða veggi eða annað efni yfirleitt
- Skoðaðar hafa verið tvær leiðir til að mynda háhita rafgas:
 - Eldsneytið lokað af með segulsviðsprýstingi í segulflöskum
 - Öflugum leysipúlsum eða jónageislum skotið á storkið eldsneyti

Framleiðsla með rafgasi

- Framleiðsla smárása
- Framleiðsla einstæðra efna
- Herðing tóla
- Ræktun myndlausra kísilhúða
- Ræktun segulmagnaðra húða

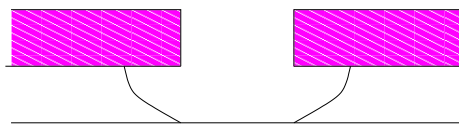
Framleiðsla með rafgasi

- Megin notkunarvið rafgasa í framleiðslu er í rafeindaiðnaðinum (smárásir) (1)
- Rafgös eru notuð til að æta í hálfleiðara, málma og rafsvara
- Með rafgösum eru ræktaðar þunnar húðir úr hálfleiðurum, málmum og rafsvörum
- Rafgasefnafræðin er flókin, þar fara saman hlutlausar og hlaðnar agnir
- Orkudreifing rafeindanna gegnir þar lykilhlutverki
- Samspil jóna og hvarfgjarnra frumeinda og sameinda er virkara í ætingu og ræktun en jónir og hvarfgjarnar eindir einar sér

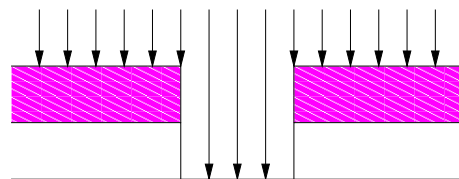
Framleiðsla með rafgasi

- Þegar tól á smárásam fara síminnkandi (nú ~ 90 nm) verður sífellt að bæta framleiðsluferlin
- Þetta varð til þess að iðnaðurinn færði sig úr votri ætingu í þurra

(a)

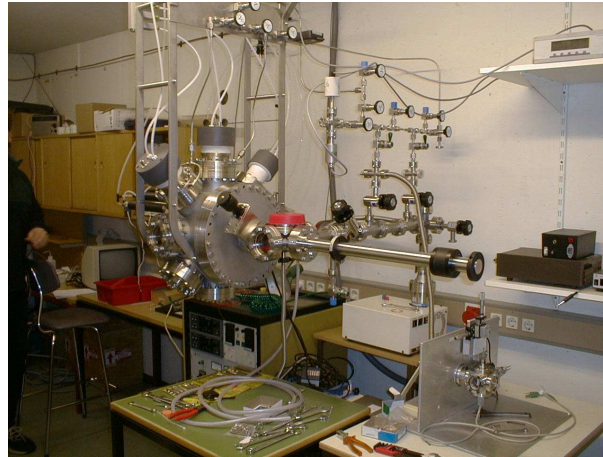


(b)



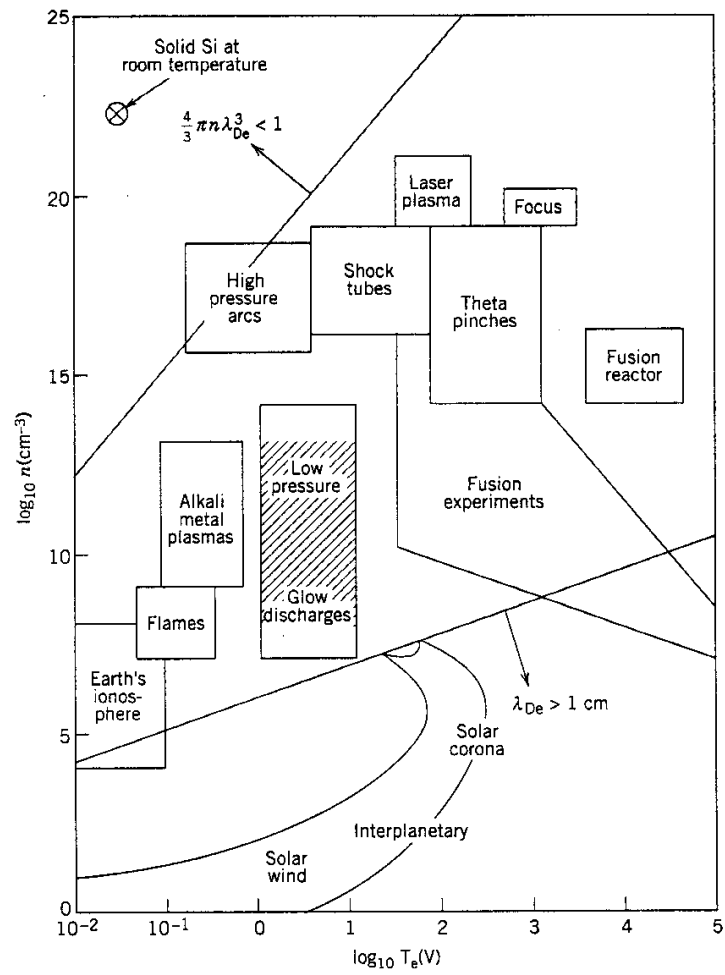
- Ætingarþversnið (a) vot eða efnaæting og (b) þurr eða rafgas æting

Rafgas



- Á Raunvísindastofnun Háskólans eru svonefndar segulspætur
- Þær eru notaðar eru til að framkalla hlutjónað rafgas til ræktunar á þunnum húðum úr málmí og málmblöndum
- Efnasamsetning rafgassins ræður þá efnasamsetningu og efniseiginleikum málmhúðarinnar

Rafgas

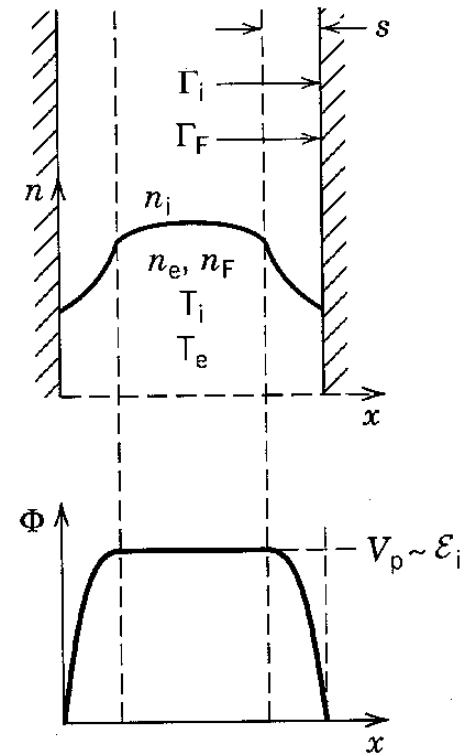
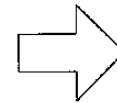
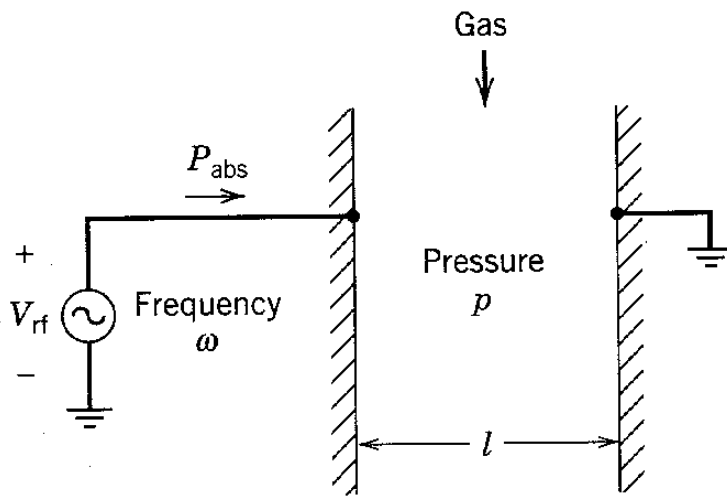


Kennistærðir rafgass

Rafgasið hefur eftirfarandi eiginleika (kennistærðir)

- Rafeindapéttleiki n_e og jónapéttleiki n_i
- Rafeindahitastig 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 er mætti, rafgasmættið, V_{pl}

Kennistærðir rafgass



Kennistærðir rafgass

Gefnar stýristærðirnar

- Gasþrýstingur p
- Afl P_{abs} eða spenna V_{rf}
- Driftíðni ω
- Stærð afhleðslunnar R og L

Þá fýsir okkur að vita

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

Meðalrúmmáslíkan

Rafgasefnafræðin getur verið flókin

Argon rafgas samanstendur af

$e, \text{Ar}, \text{Ar}^+, \text{Ar}^*, \dots$

Súrefnisrafgas samanstendur af

$e, \text{O}, \text{O}_2, \text{O}_2^+, \text{O}^+, \text{O}_2^-, \text{O}^-, \text{O}_2^*, \text{O}^*, \dots$

SF_6 rafgas samanstendur af

$e, \text{SF}_6, \text{SF}_5^+, \text{SF}_4^+, \text{SF}_3^+, \text{F}^+, \text{F}^-, \text{F}^*, \text{F}_2, \text{F}, \dots$

Meðalrúmmáslíkan

Meðalrúmmáslíkanið byggir á:

- Afl jafnvægi
- Agna jafnvægi fyrir allar agnir

Fyrir argon rafgas (eínatóma):

Afl jafnvægi

- Ísogið afl = Tapað afl
- $P_{\text{abs}} = en_o u_B A_{\text{eff}} \mathcal{E}_T$

Agna jafnvægi

- Agnir tapast á yfirborði = Jónun í bol
- $n_o u_B A_{\text{eff}} = k_{iz} n_g n_o \pi R^2 L$

Meðalrúmmáslíkan

Heildarorkan sem tapast við hverja jón sem tapast er

$$\mathcal{E}_T = \mathcal{E}_c + \mathcal{E}_e + \mathcal{E}_i$$

þar sem

- \mathcal{E}_c er árekstraorkan sem tapast við hvert rafeinda - jónapar sem er myndað

$$\mathcal{E}_c = \mathcal{E}_{iz} + \sum_i \mathcal{E}_{ex,i} \frac{k_{ex,i}}{k_{iz}} + \frac{k_{el}}{k_{iz}} \frac{3m_e}{m_i} T_e$$

- \mathcal{E}_e er meðalhreyfiorka hvernar rafeindar sem tapast. Ef gert er ráð fyrir að orka rafeindanna hlíti Maxwell dreifingu þá er $\mathcal{E}_e = 2T_e$
- \mathcal{E}_i er meðalhreyfiorka jóna er þær tapast og ræðst af spennufalli yfir slíðrið

Meðalrúmmálslíkan

- Hraðafastar (e. rate constant) eru reiknaðir út frá líkindaþversniðum með því að gera ráð fyrir að orka rafeindanna hlíti dreifingu Maxwell

$$k = \left(\frac{2e}{m_e} \right)^{1/2} \int_0^{\infty} \mathcal{E}^{1/2} \sigma(\mathcal{E}) f(\mathcal{E}) d\mathcal{E}$$

- Bohm hraðinn

$$u_B = \left(\frac{eT_e}{m_i} \right)^{1/2}$$

- Virkt flatarmál

$$A_{\text{eff}} = 2\pi R (Rh_R + Lh_L)$$

þar sem $h_R = n_{sR}/n_o$ og $h_L = n_{sL}/n_o$

Meðalrúmmálslíkan

Meðalrúmmálslíkanið

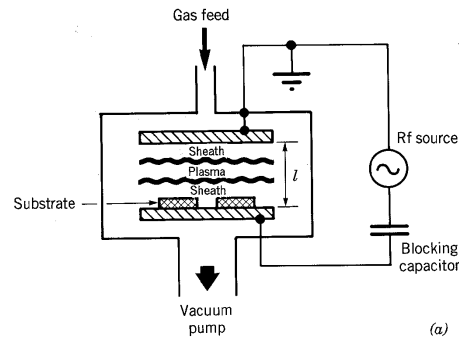
Kostir

- Mat á helstu kennistærðum rafgass með tiltölulega einföldum reikningum (n_e, T_e, V_{pl}, n_i)
- Tæki til að meta hvaða hvörf eru mikilvæg í tilteknum blöndum

Takmörkun

- Er meðaltalslíkan, gefur ekki rúmmfræðilega dreifingu stærða
- Orkudreififall rafeindanna er gefin stærð

Rafgas og afhleðslur

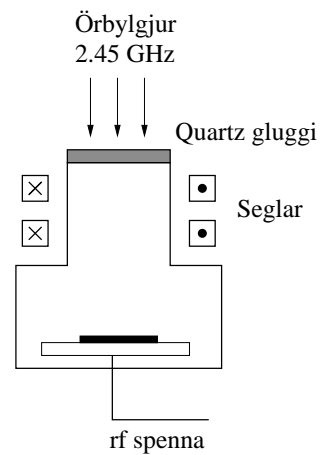


Rýmdarafhleðsla (e. Capacitive discharge)

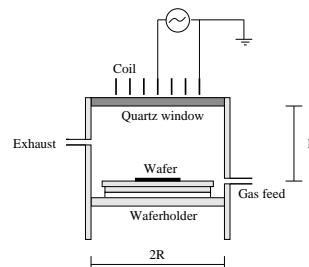
- Framan af var þurr æting framkvæmd í rýmdarafhleðslu þar sem saman fór jónahríð og hvarfgjarnar hlutlausar eindir (frumeindir og sameindir)
- Jónapéttleiki ræðst af rf spennunni sem lögð er á milli platnanna (plötupéttir). Jónapéttleika og orku jónanna er því ekki hægt að stjórna óháð hvoru öðru

Rafgas og afhleðslur

Hringhraðalafhleðsla (e. Electron cyclotron resonance (ECR) discharge)



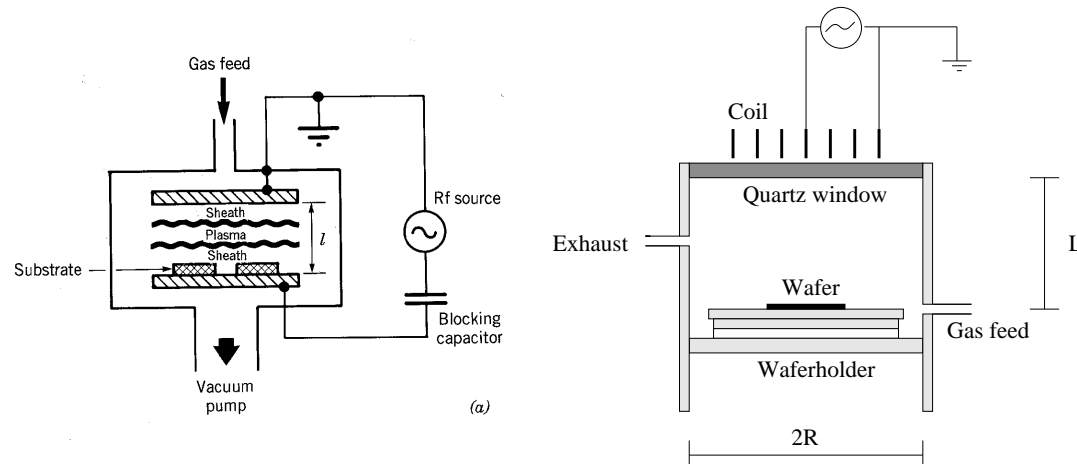
Spanafhleðsla (e. Inductively coupled discharge)



Rafgas og afhleðslur

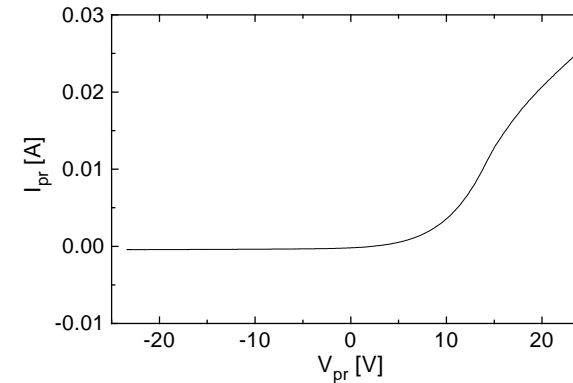
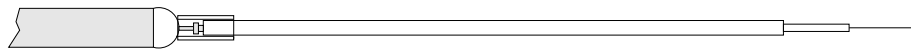
- Til að auka framleiðslugetu og fá betri stýringu á framleiðslunni hafa verið þróaðar nýjar afhleðslur fyrir rafeindaiðnaðinn (2; 3)
- Spanafhleðsla og ECR afhleðsla hafa 1 – 2 stærðargráðum hærrí jónapétteleika en rýmdarafhleðsla
- Orka jóna er um stærðargráðu lægri (og stýranleg)
- Í þessum nýju afhleðslum er óháð stjórn á jónapétteleika og orku jóna
 - Jónapétteleika er stjórnað með afli til spanspólu (eða örbylgjuafli)
 - Orku jóna er stjórnað með rf spennu sem lögð er á sýnahaldarann

Rafgas og afhleðslur



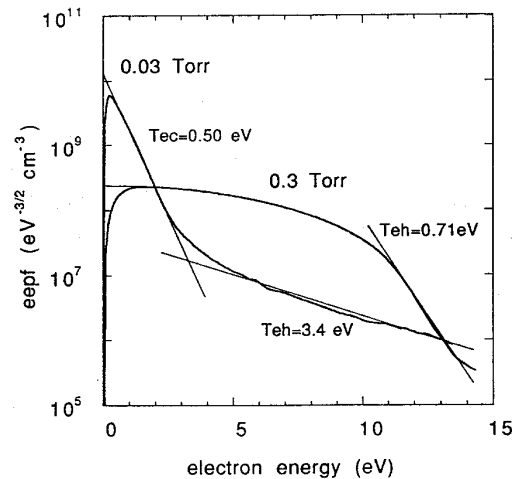
	Rýmdarafhleðsla	Hærri þéttleiki
Þrýstingur [mTorr]	10 – 1000	0.5 – 50
Afl [W]	50 – 2000	100 – 5000
Driftíðni [Mhz]	0.05 – 13.56	0 – 2450
Rafeindaþéttleiki [cm^{-3}]	$10^9 - 10^{10}$	$10^{10} - 10^{12}$
Rafeindahitastig [eV]	1 – 5	2 – 7
Orka jóna [V]	200 – 1000	< 100

Langmuirnemi



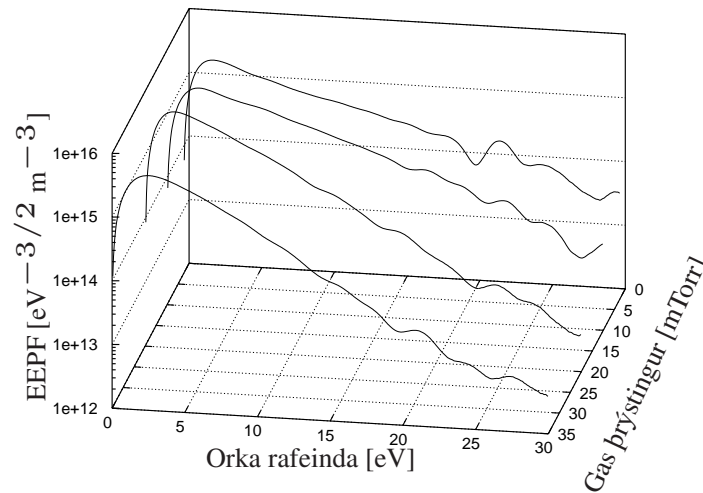
- Einfaldur vír sem stungið er inn í rafgasið
- $I - V$ kennilínan gefur
 - rafeindapéttleika n_e
 - rafeindahitastig T_{eff}
 - rafgasmættið V_{pl}
 - orkudreififall rafeindanna (EEDF)

Rafeindir-Rýmdarafhleðsla



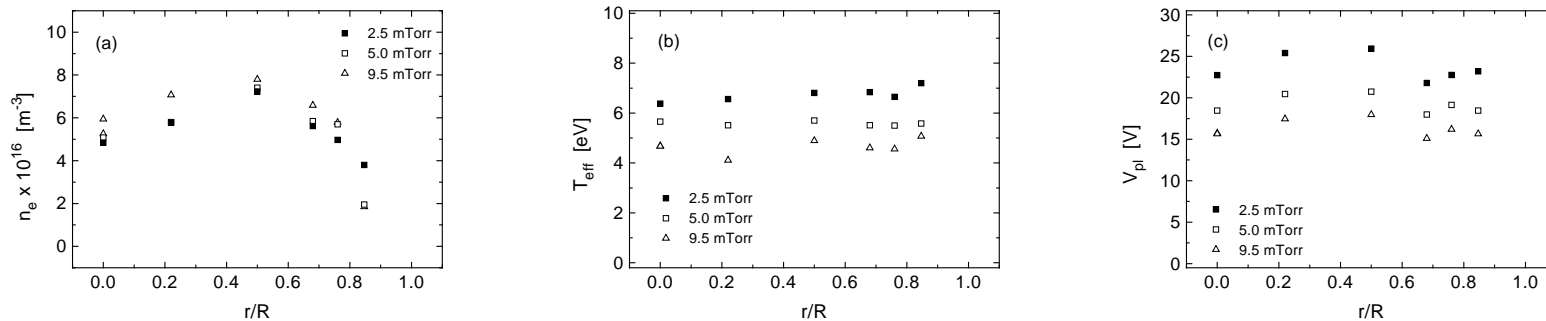
- Líkindadreifing orku rafeindanna (EEDF) í miðju argon rýmdarafhleðslu mæld með Langmuir nema við 30 og 300 mTorr þrýsting (5).
- Líkindadreifingunni má lýsa með summu tveggja Maxwell dreifinga við lágan gasþrýsting og hún verður líkari Druyvesteyn dreifingu þegar gasþrýstingur hækkar.

Rafeindir-Spanafhleðsla



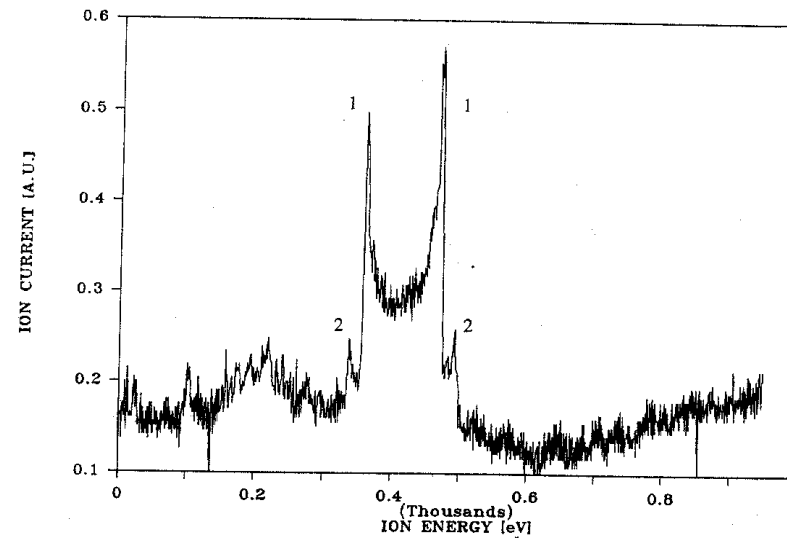
- Líkindadreifing orku rafeindanna (EPPF) í miðju spanaðrar súrefnisafhleðslu við 720 W mæld með Langmuir nema við 2.5, 10, 20 og 35 mTorr þrýsting.
- Orkudreifing rafeindanna hlítir Maxwell dreifingu við lágan gasþrýsting og víkur frá henni þegar þrýstingur er hækkaður

Rafeindir-Spanafhleðsla



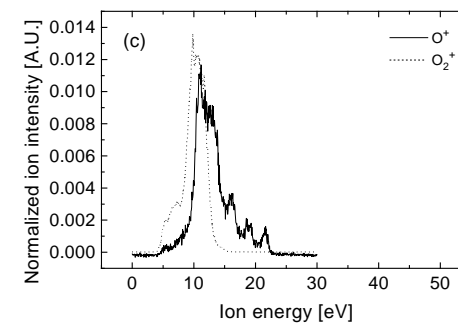
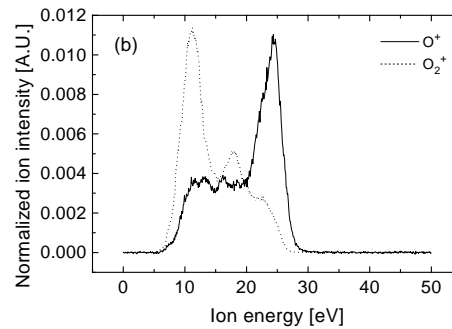
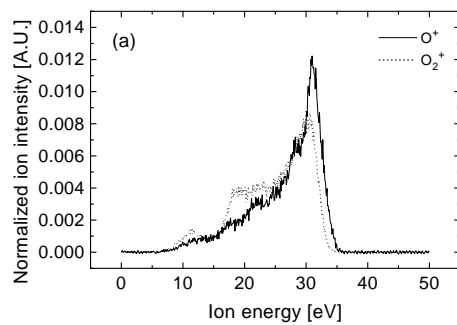
- Hegðun kennistærða eftir radía spanaðrar súrefnisafhleðslu við 720 W, mældum með Langmuir nema, (a) rafeindapéttleiki n_e (b) virkt rafeindahitastig T_{eff} og (c) dc rafgasmætti.

Jónir-Rýmdarafhleðsla



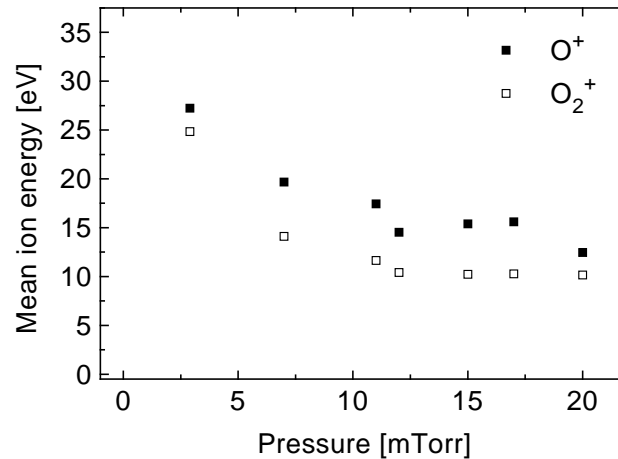
- Orkudreifing jóna frá rýmdarafhleðslu í súrefni við 1000 W og 2 mTorr gasþrýsting. Toppur merktir 1 stafa frá orkudreifingu O_2^+ jóna og toppur merktir 2 stafa frá orkudreifingu O^+ jóna (6)

Jónir-Spanafhleðsla



- Orkudreifing jóna frá spanaðri súrefnisafhleðslu við 675 W mælt við 3, 7 og 20 mTorr þrýsting (7).
- Orka jónanna þegar þær lenda á yfirborði er mæld með massa- og orkugreini

Jónir-Spanafhleðsla



- Meðalorka O⁺ og O₂⁺ jóna í súrefnisrafgasi við 565 W mæld sem fall af gasþrýstingi í flatri spanafhleðslu
- Orka jóna

$$\mathcal{E}_i = \frac{T_e}{2} + V_{pl} + V_{rf} \sin(\omega t)$$

Samantekt

- Farið var yfir helstu kennistærðir rafgass
- Fjallað var um Langmuirnema og notkun þeirra til að mæla kennistærðir rafeinda í afhleðslum
- Sýndar voru og bornar saman niðurstöður mælinga á orkudreifingu jóna frá rýmdar- og spanafhleðslu

Heimildir

- [1] D. B. Graves. Plasma processing. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 22:31 – 42, 1994.
- [2] M. A. Lieberman and R. A. Gottscho. Design of high-density plasma sources for materials processing. In M. Francombe and J. Vossen, editors, *Physics of Thin Films, vol. 18*, Academic Press, pages 1 – 119. 1994.
- [3] Jón Tómas Guðmundsson, Veikt jónað rafgas: Kennistærðir og notkun, í Eðlisfræði á Íslandi IX, Ritstjóri Ari Ólafsson, (1999) bls. 117 - 128
- [4] Jón Tómas Guðmundsson, Rafgas í framleiðslu smárása, *Raflost* 23:6 – 10, 2001
- [5] V. A. Godyak, R. B. Piejak, and B. M. Alexandrovich. Probe diagnostics of non-Maxwellian plasmas. *Journal of Applied Physics*, 73:3657 – 3663, 1993.
- [6] A. D. Kuypers and H. J. Hopman. Ion energy measurements at the powered electrode in an rf discharge. *Journal of Applied Physics*, 63:1894 – 1898, 1988.
- [7] J. T. Gudmundsson. The ion energy distribution in a planar inductive oxygen discharge. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 32:798 – 803, 1999.
- [8] Jón Tómas Guðmundsson, Eðlisfræði rafgasa: Nokkur grunnhugtök. *Tímarit um raunvísindi og stærðfræði*, 6(1):47 – 58, 2009.