

**Framleiðsla smárása:**

# **Rafgas**

## **Kafli 19**

**Jón Tómas Guðmundsson**

**tumi@hi.is**

**12. vika haust 2016**

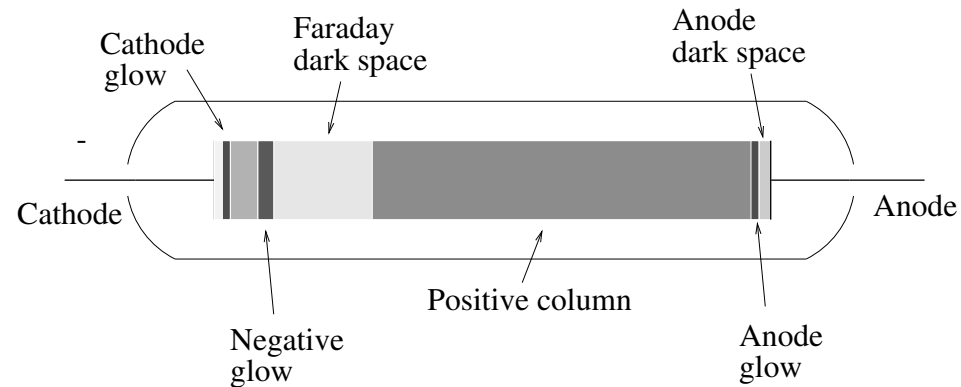
## Yfirlit

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

## Rafgas

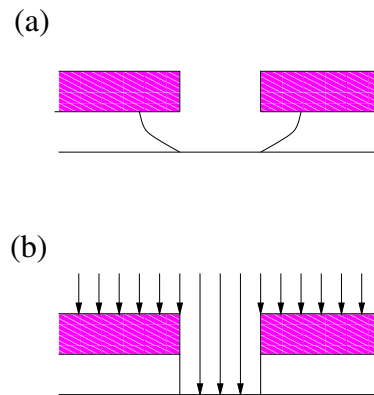
- Rafgas er hlut- eða fulljónað gas sem inniheldur rafeindir, jónir, hlutlausar frumeindir og sameindir
- Full jónað rafgas inniheldur einungis rafeindir og jónir en hlutjónað rafgas inniheldur jafnframt hlutlausar agnir
- Megnið af alheiminum er rafgas
  - Iður stjarna og gufuhvolf þeirra, gaskennd 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 vegg 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

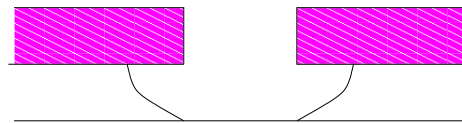
- Megin notkunarvið rafgasa í framleiðslu er í rafeindaiðnaðinum (smárásir) (1)
- Rafgös eru notuð til að æta í hálfleiðara, málma og rafsvara
- Með rafgösum eru ræktaðar þunnar húðir úr hálfleiðurum, málmum og rafsvörum
- Rafgasefnafræðin er flókin, þar fara saman hlutlausar og hlaðnar agnir
- Orkudreifing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



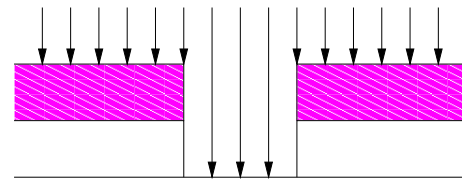
## Framleiðsla með rafgasi

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

(a)

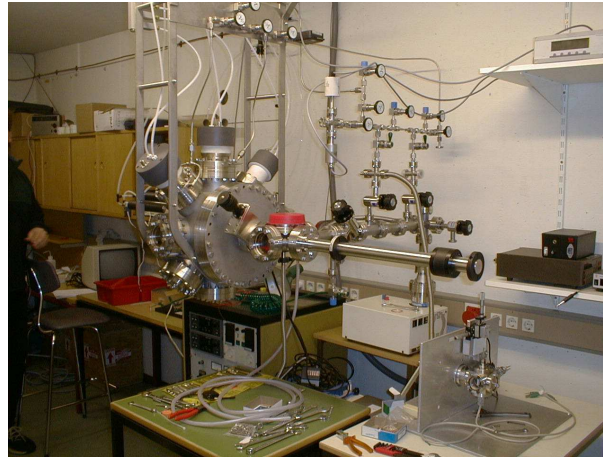


(b)



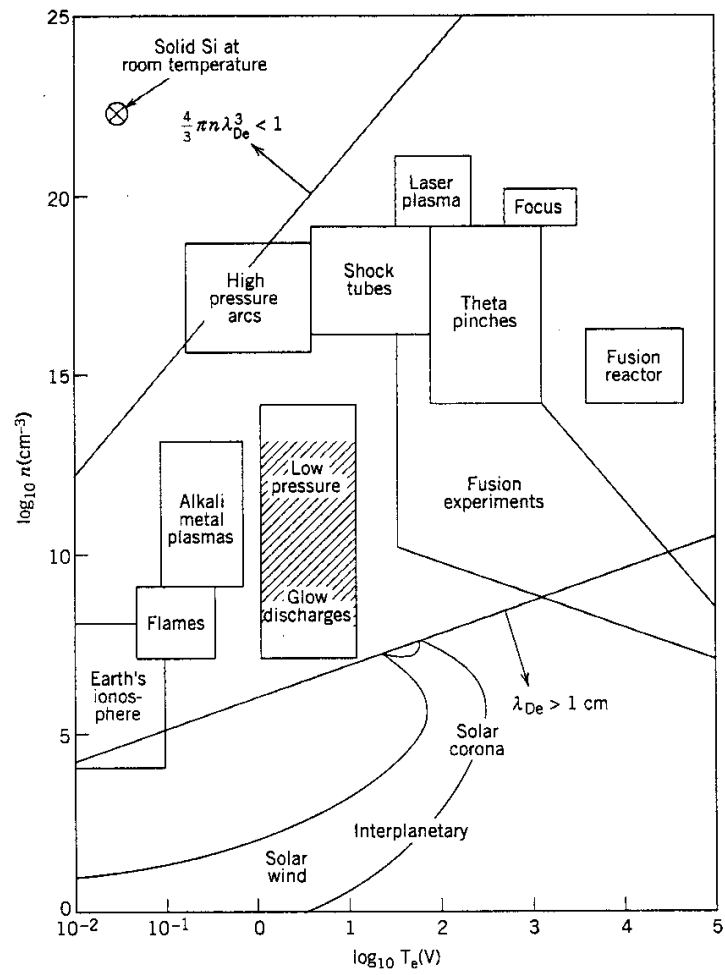
- Ætingarþversnið (a) vot eða efnaæting og (b) þurr eða rafgas æting

# 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

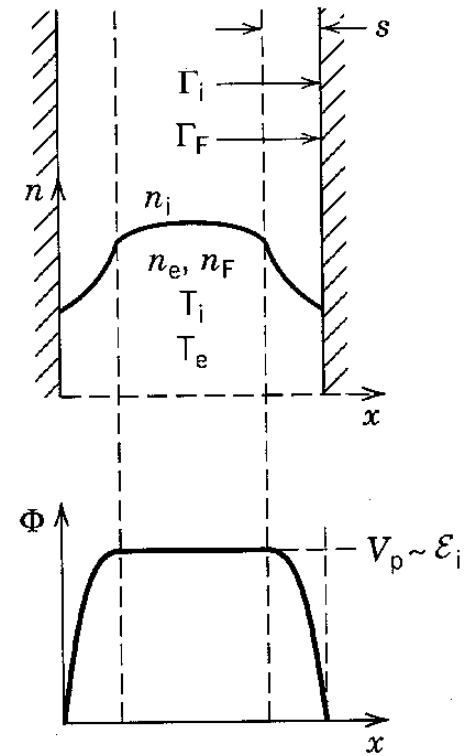
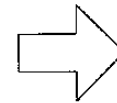
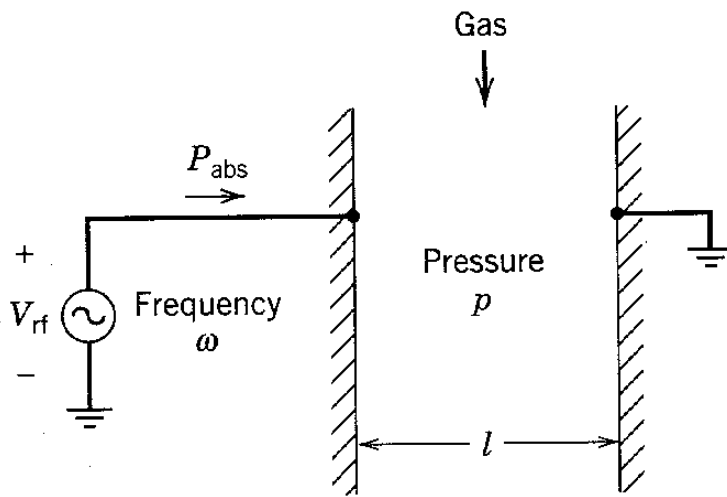


## Kennistærðir rafgass

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  $P_{\text{abs}}$  eða spenna  $V_{\text{rf}}$
- Driftíðni  $\omega$
- Stærð afhleðslunnar  $R$  og  $L$

Þá fýsir okkur að vita

- Flæði jóna og atóma til yfirborðs  $\Gamma_i, \Gamma_n$
- 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

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

$\text{SF}_6$  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 (einatóma):

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

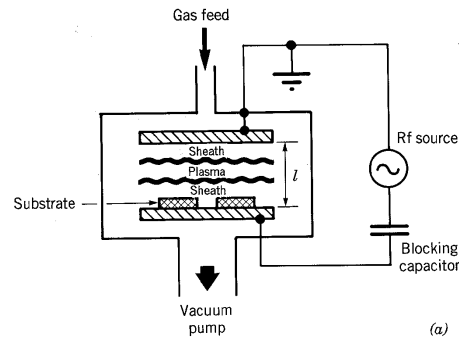
Kostir

- 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

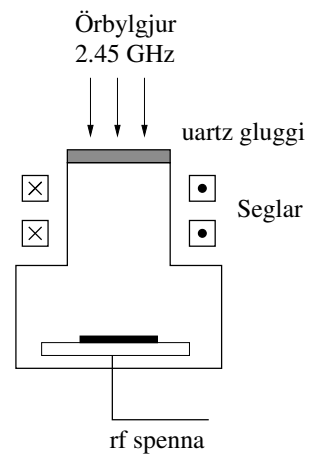


## Rýmdarafhleðsla (e. Capacitive discharge)

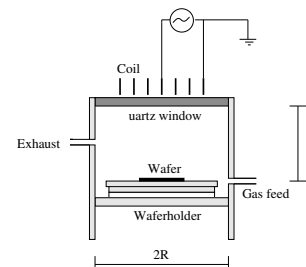
- Framan af var þurr æting framkvæmd í rýmdarafhleðslu þar sem saman fór jónahríð og hvarfgjarnar hlutlausar eindir (frumeindir og sameindir)
- Jónapéttleiki ræðst af rf spennunni sem lögð er á milli platnanna (plötupéttir). Jónapéttleika og orku jónanna er því ekki hægt að stjórna óháð hvoru öðru

# Rafgas og afhleðslur

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



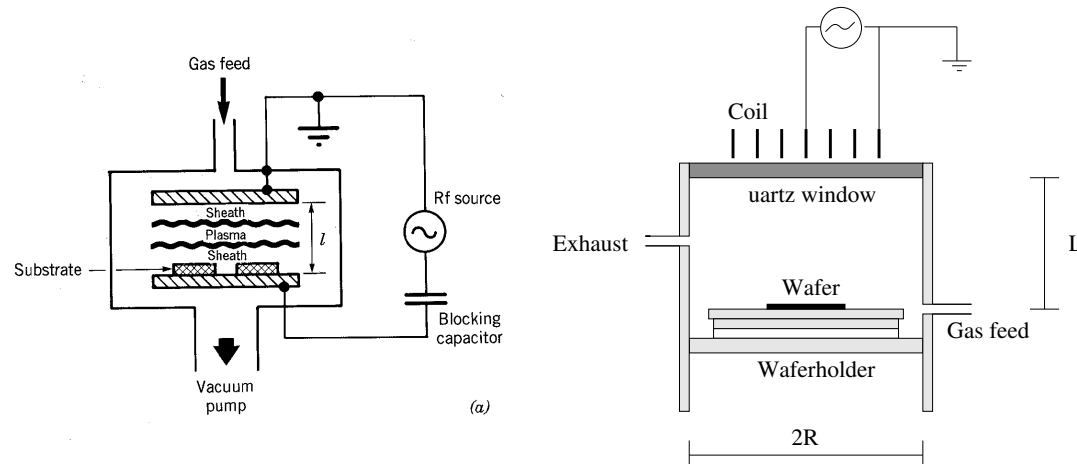
## Spanafhleðsla (e. Inductively coupled discharge)



## Rafgas og afhleðslur

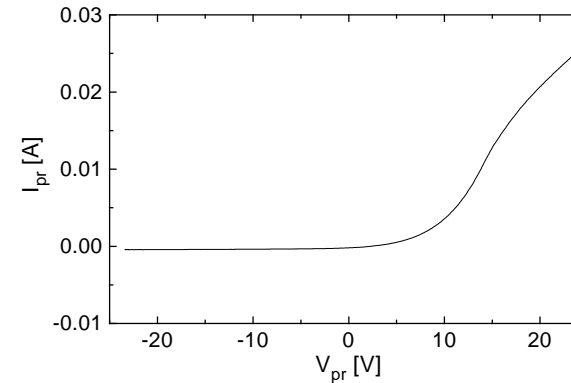
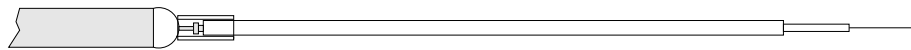
- Til að auka framleiðslugetu og fá betri stýringu á framleiðslunni hafa verið þróaðar nýjar afhleðslur fyrir rafeindaiðnaðinn (2; 3)
- Spanafhleðsla og ECR afhleðsla hafa 1 – 2 stærðargráðum hærrí jónapétteleika en rýmdarafhleðsla
- Orka jóna er um stærðargráðu lægri (og stýranleg)
- Í þessum nýju afhleðslum 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 [ $\text{cm}^{-3}$ ]	$10^9$ – $10^{10}$	$10^{10}$ – $10^{12}$
Rafeindahitastig [eV]	1 – 5	2 – 7
Orka jóna [V]	200 – 1000	< 100

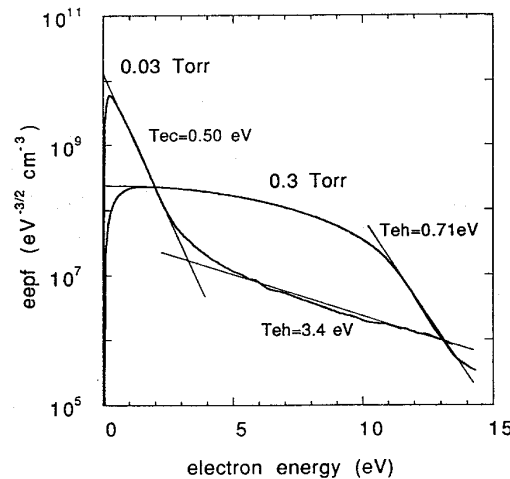
# Langmuirnemi



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

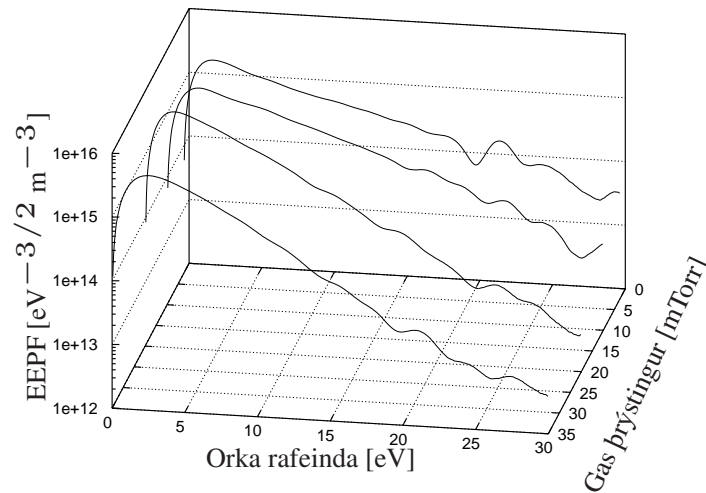


## Rafeindir-Rýmdarafhleðsla



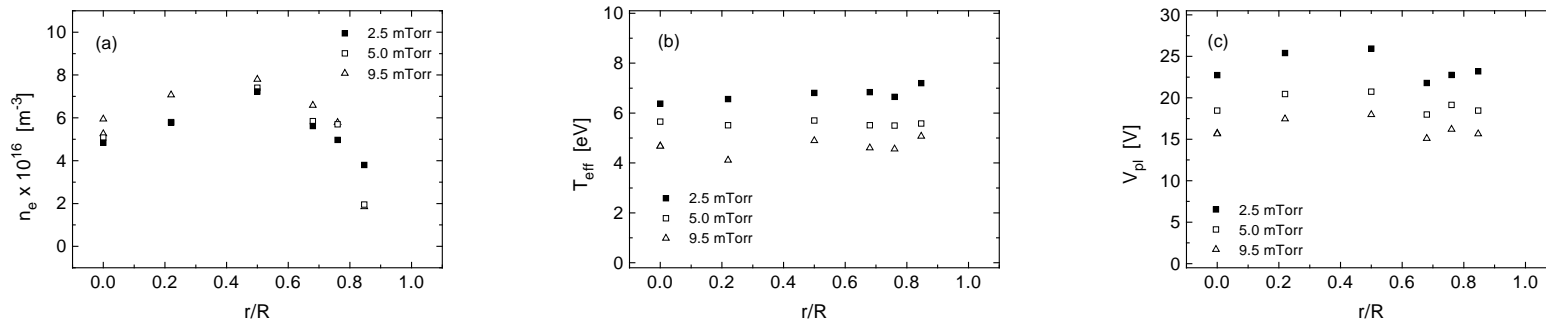
- Líkindadreifing orku rafeindanna (EEDF) í miðju argon rýmdarafhleðslu mæld með Langmuir nema við 30 og 300 mTorr þrýsting (5).
- Líkindadreifingunni má lýsa með summu tveggja Maxwell dreifinga við lágan gasþrýsting og hún verður líkari Druyvesteyn dreifingu þegar gasþrýstingur hækkar.

# Rafeindir-Spanafhleðsla



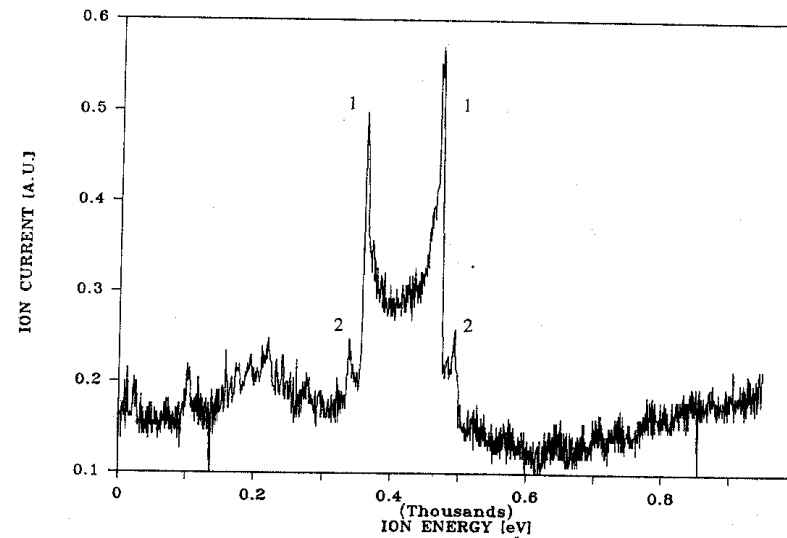
- Líkindadreifing orku rafeindanna (EPPF) í miðju spanaðrar súrefnisafhleðslu við 720 W mæld með Langmuir nema við 2.5, 10, 20 og 35 mTorr þrýsting.
- Orkudreifing rafeindanna hlítir Maxwell dreifingu við lágan gasþrýsting og víkur frá henni þegar þrýstingur er hækkaður

# Rafeindir-Spanafhleðsla



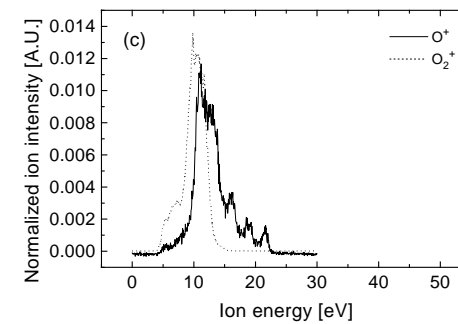
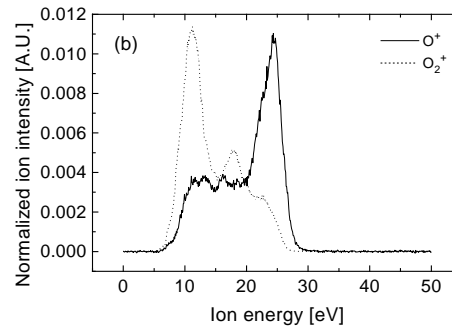
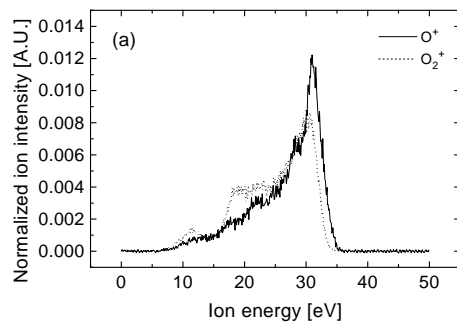
- Hegðun kennistærða eftir radía spanaðrar súrefnisafhleðslu við 720 W, mældum með Langmuir nema, (a) rafeindapéttleiki  $n_e$  (b) virkt rafeindahitastig  $T_{\text{eff}}$  og (c) dc rafgasmætti.

## Jónir-Rýmdarafhleðsla



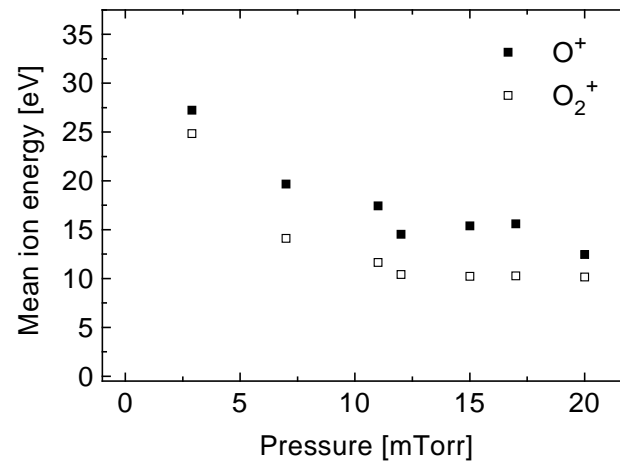
- Orkudreifing jóna frá rýmdarafhleðslu í súrefni við 1000 W og 2 mTorr gasþrýsting. Toppur merktir 1 stafa frá orkudreifingu  $O_2^+$  jóna og toppur merktir 2 stafa frá orkudreifingu  $O^+$  jóna (6)

# 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<sup>+</sup> og O<sub>2</sub><sup>+</sup> 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.