Kennistærðir rafgass

Jón Tómas Guðmundsson

Science Institute

University of Iceland

IS-107 Reykjavík

tumi@raunvis.hi.is

November 6, 1998

Yfirlit

- Rafgas og afhleðslur
- Meðalrúmmálslíkan
- Langmuir nemar
- Orkudreifing jóna
- Samantekt

Rafgas

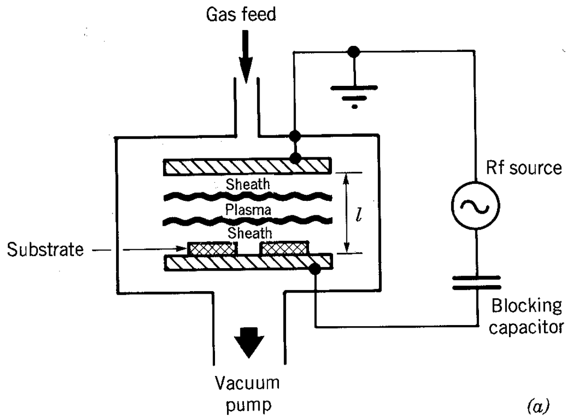
- Rafgas er hlut- eða full jónað gas sem inniheldur rafeindir, jónir, hlutlausar frumeindir og sameindir
- Veikt jónað rafgas er drifið rafrænt og álagt afl hitar fremur upp rafeindirnar sem eru léttar og hreyfanlegar
- Rafeindir og jónir eru ekki í varmajafnvægi

Framleiðsla með rafgasi

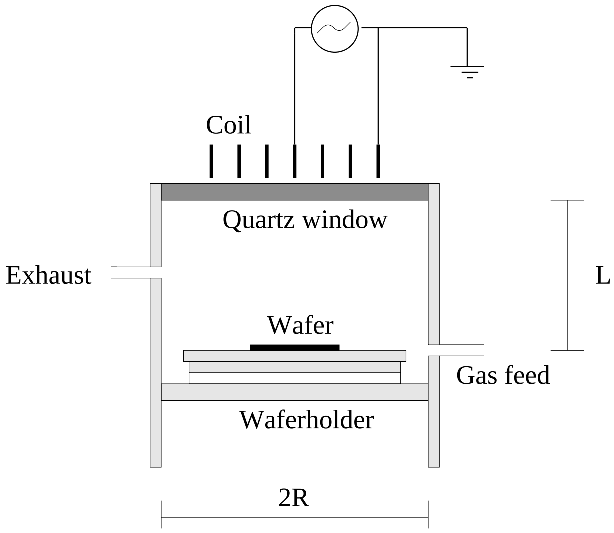
- Framleiðsla smárása
- Framleiðsla einstæðra efna
- Herðing tóla
- Ræktun myndlausra kísilhúða
- Ræktun segulmagnaðara húða

Rafgas og afhleðslur

Rýmdarafhleðsla

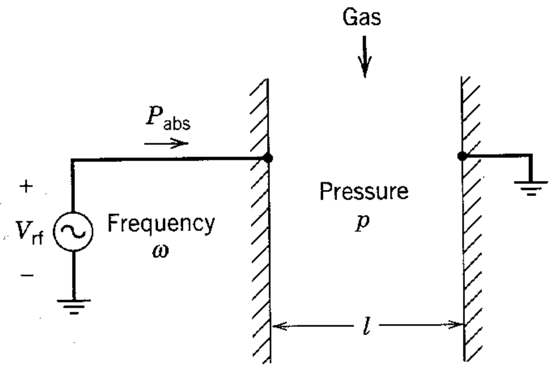


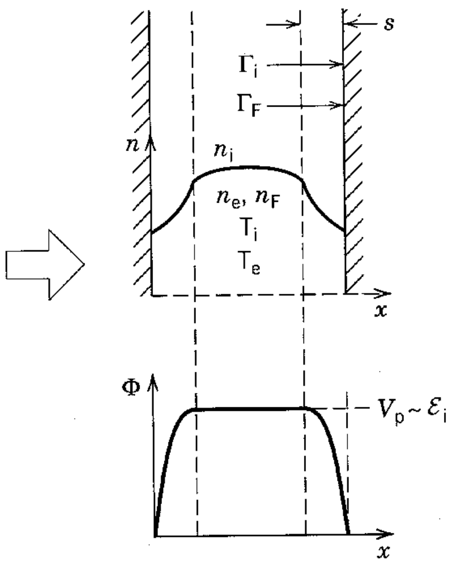
Spanafhleðsla



Rafgasið hefur eftirfarandi eiginleika (kennistærðir)

- Rafeindaþéttleiki n_e og jónaþéttleiki 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
- À milli rafgasbolsins og yfirborðsins er mætti, rafgasmættið, V_{pl}



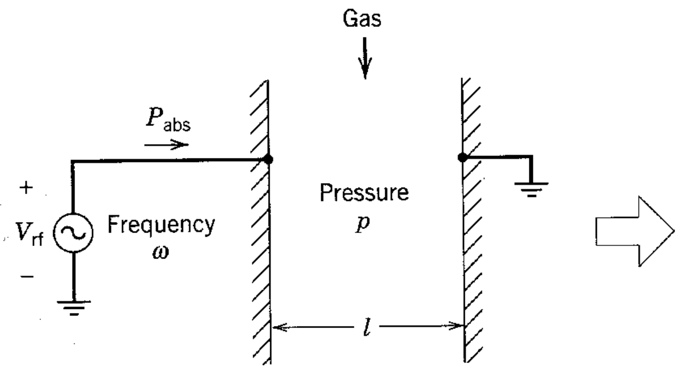


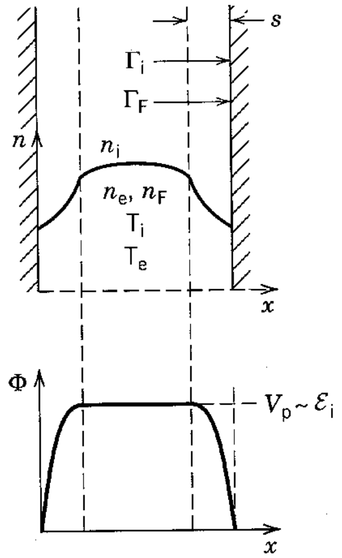
Gefnar stýristærðirnar

- 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





Meðalrúmmálslíkan

Rafgasefnafræðin getur verið flókin

Argon rafgas samanstendur af

e, Ar, Ar^+, Ar^*,...

Súrefnisrafgas samanstendur af

e, O, O_2, O_2^+, O^+, O_2^-, O^-, O_2^*, O^*, ...

SF_6 rafgas samanstendur af

e, SF_6, SF_5^+, SF_4^+, SF_3^+, F^+, F^-, F^*, F_2, F,....

Meðalrúmmálslíkanið byggir á:

- Afl jafnvægi
- Agna jafnvægi fyrir allar agnir

Fyrir argon rafgas (einatóma):

Afl jafnvægi

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

Agna jafnvægi

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

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 hverrar rafeindar sem tapast. Ef gert er ráð fyrir að orka rafeindanna hlíti Maxwell dreifingu þá er $\mathcal{E}_e = 2T_e$

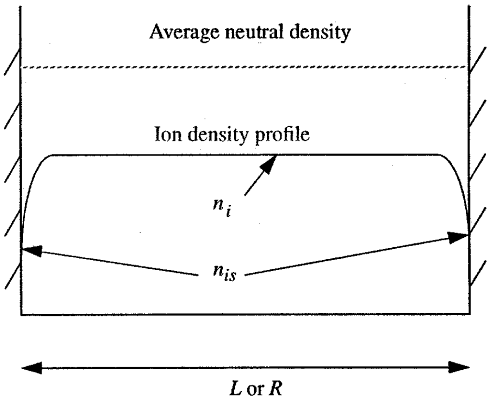
- $\mathcal{E}_i$ er meðalhreyfiorka jóna er þær tapast og ræðst af spennufalli yfir slíðrið

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

$$A_{eff} = 2\pi R\left(Rh_L + Lh_L\right)$$

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

Meðalrúmmálslíkanið

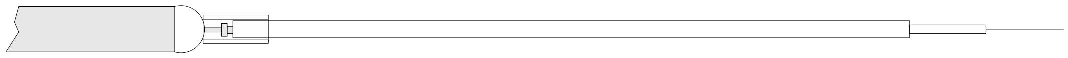
Kostir

- 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

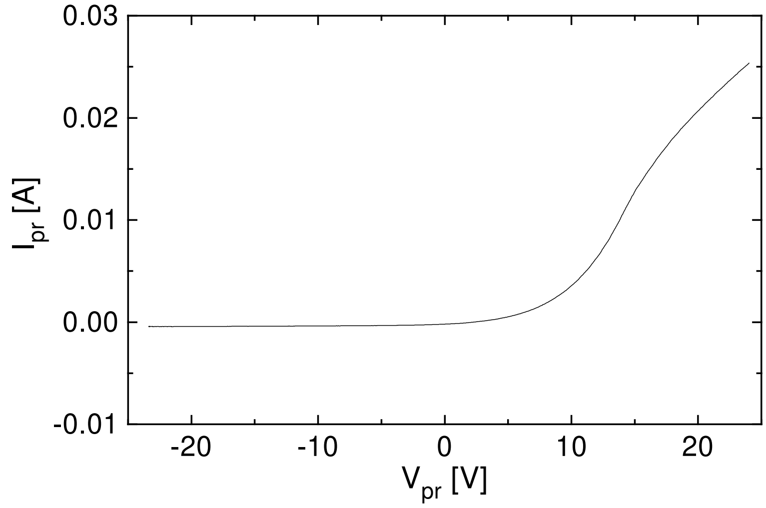
Takmörkun

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

Langmuirnemi



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



Stýristærðir

- 50 % O_2 / 50 % Ar
- $P_{abs} \approx 620$ W
- $p = 30$ mTorr

Kennistærðir

- $n_e = 1.25 \times 10^{17}$ m^{-3}
- $T_{eff} = 4.0$ eV
- $V_{pl} = 14$ V

Orkudreififall rafeindanna (e. electron energy dsitribution function (EEDF)) er fundið með

$$g_e(V) = \frac{2m_e}{e^2 A}\left(\frac{2eV}{m_e}\right)^{1/2}\frac{\mathrm{d}^2 I_e}{\mathrm{d}V^2}$$

þar sem A er flatarmál nemans, I_e rafeindastraumur að nemanum og V er álögð spenna.

Líkindadreifing orku rafeindanna (e. electron energy probability function (EEPF)) er þá

$$g_p(\mathcal{E}) = \mathcal{E}^{-1/2} g_e(\mathcal{E})$$

Ef orka rafeindanna hlýtir dreifingu Maxwell þá er

$$g_p(\mathcal{E}) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} n_e T_e^{-3/2} \exp\left(-\frac{\mathcal{E}}{T_e}\right)$$

svo að $\ln g_p$ sem fall af $\mathcal{E}$ er línulegt.

Þéttleiki rafeindanna er þá

$$n_e = \int_0^\infty g_e(\mathcal{E}) \mathrm{d}\mathcal{E}$$

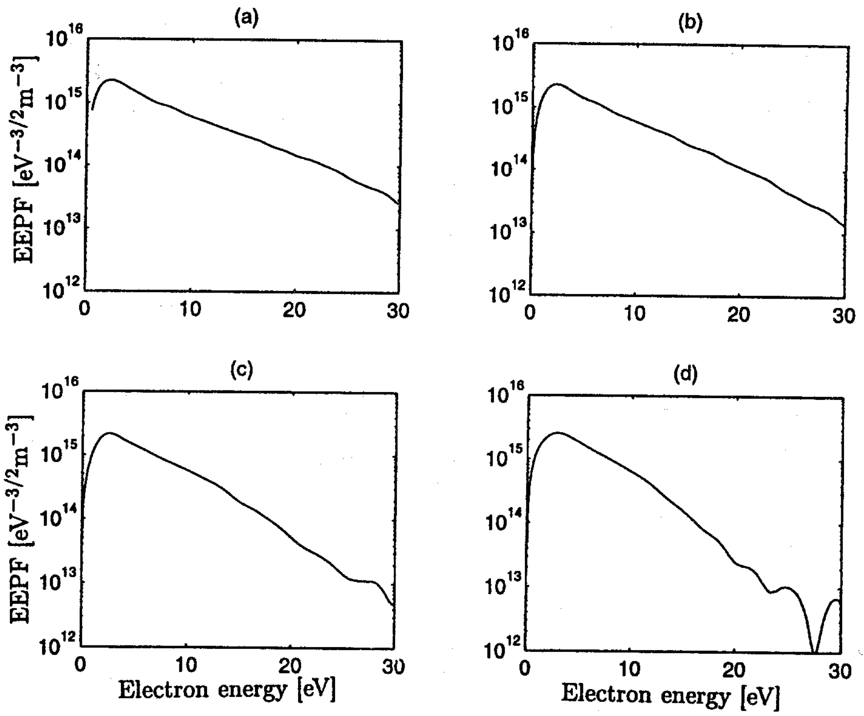
og meðalorka rafeindanna

$$\langle \mathcal{E} \rangle = \frac{1}{n_e} \int_0^\infty \mathcal{E} g_e(\mathcal{E}) \mathrm{d}\mathcal{E}$$

Virkt rafeindahitastig er skilgreint með

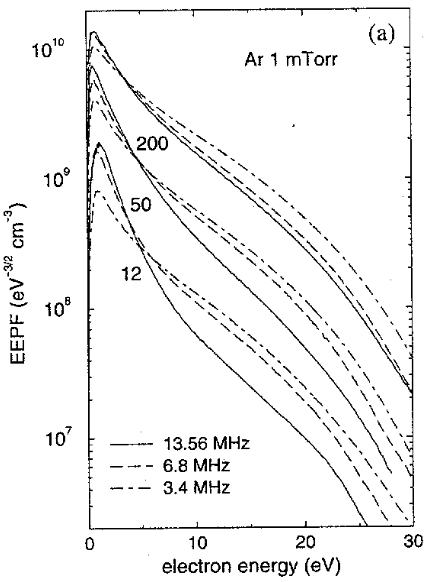
$$T_{eff} = \frac{2}{3} \langle \mathcal{E} \rangle$$

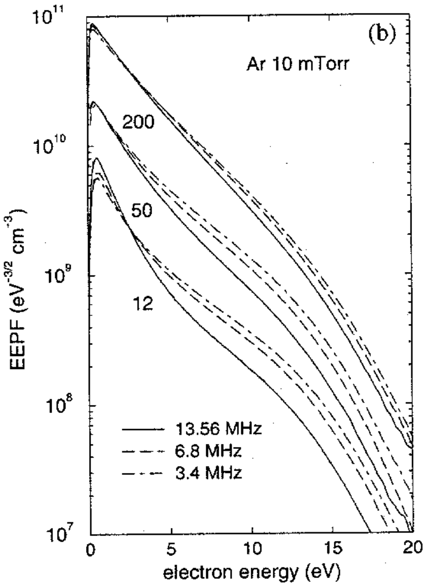
Rafgasmættið V_{pl} er ákvarðað sem spennan þegar önnur afleiða rafeindastraumsins er núll, $\frac{\mathrm{d}^2 I_e}{\mathrm{d}V^2} = 0$



Líkindadreifing orku rafeinda (EEPF) í H_2/Ar rafgasi við 380 W og 0.33 Ar/ 0.67 H_2 (a) 2 mTorr, (b) 3 mTorr (c) 10 mTorr og (d) 20 mTorr.

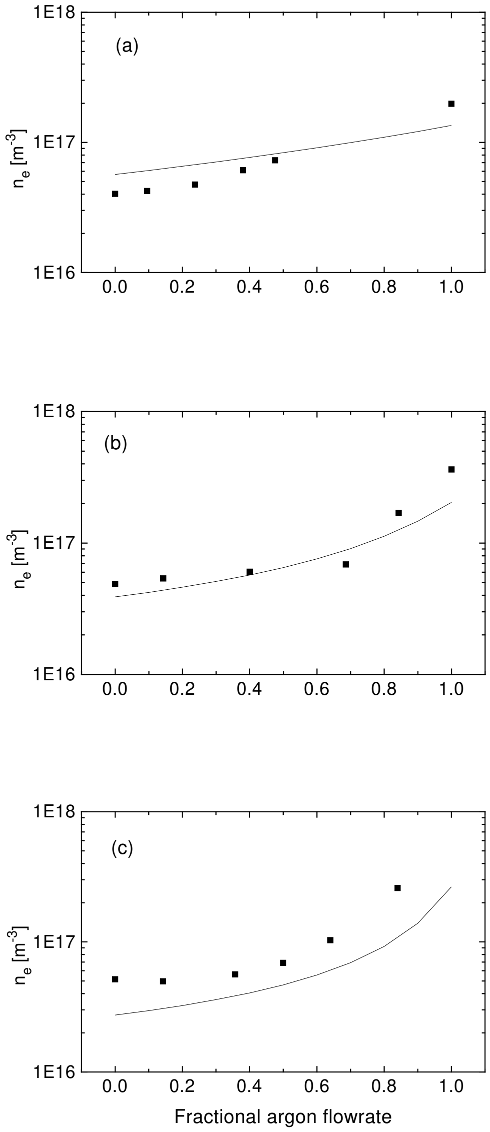
Orkudreifing rafeindanna hlítir Maxwell dreifingu við lágan gasþrýsting og víkur frá henni þegar þrýstingur er hækkaður.





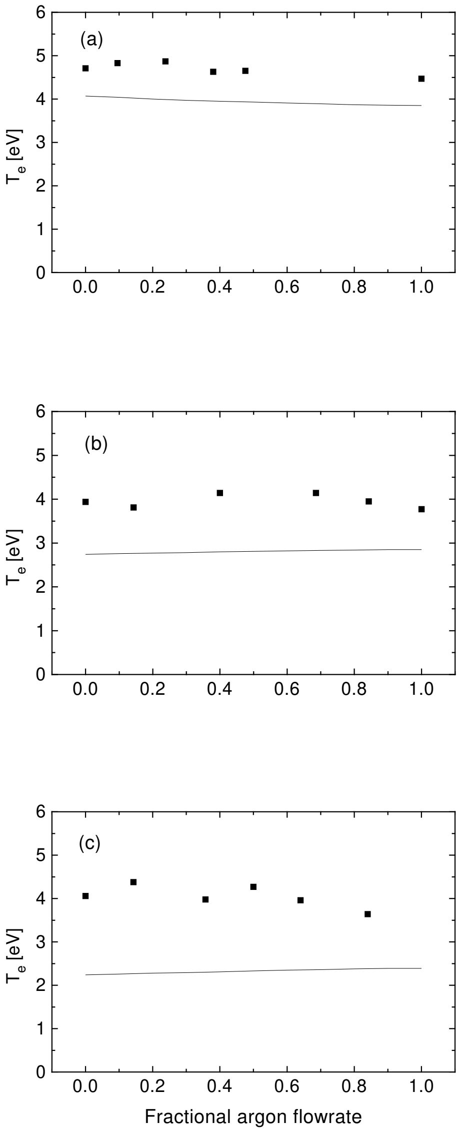
Líkindadreifing orku rafeinda í flatri spanafhleðslu

(Godyak and Kolobov, PRL **81** (1998) 369)



Þéttleiki rafeinda í O_2/Ar rafgasi við 330 W, sem fall af hlutfallslegu flæði Ar í blöndunni við (a) 4 mTorr, (b) 13 mTorr and (c) 30 mTorr

Borið saman við meðalrúmmálslíkan þar sem $\gamma = 0.05$

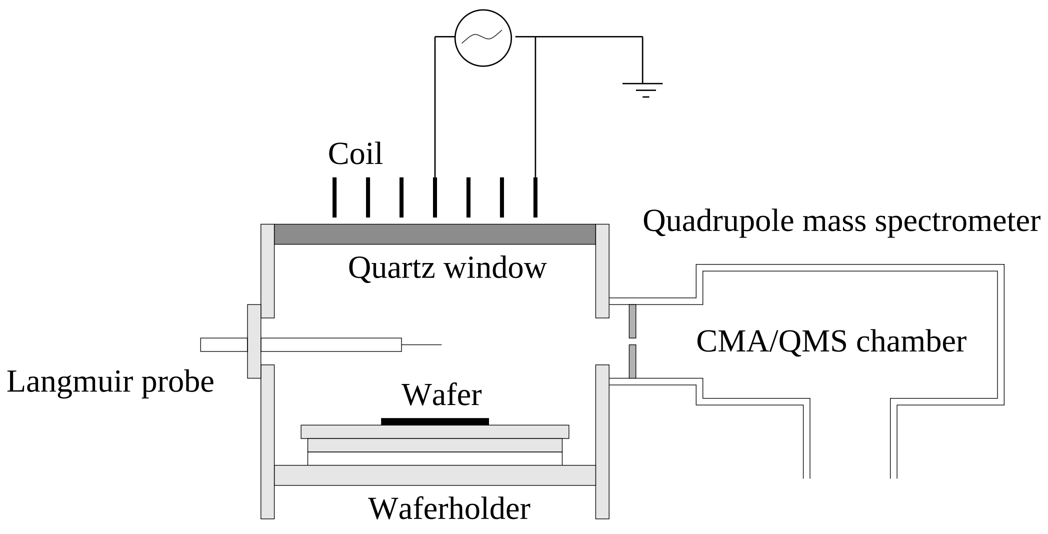


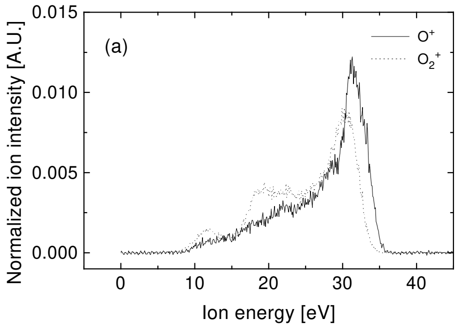
Virkt rafeindahitastig í O_2/Ar rafgasi við 330 W, sem fall af hlutfallslegu flæði Ar í blöndunni við (a) 4 mTorr, (b) 13 mTorr and (c) 30 mTorr

Borið saman við meðalrúmmálslíkan þar sem $\gamma = 0.05$

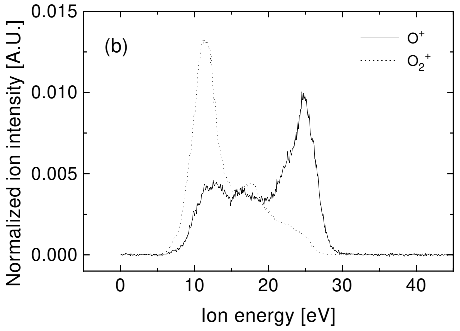
Orkudreifing jóna

Orka jónanna þegar þær lenda á yfirborði er mæld með massa- og orkugreini

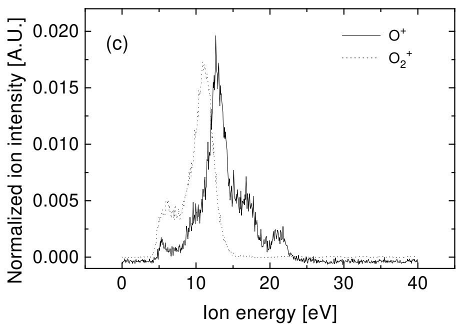




3 mTorr

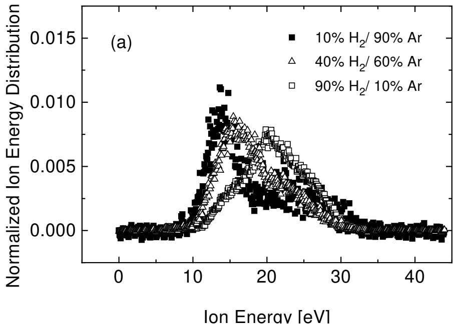


7 mTorr

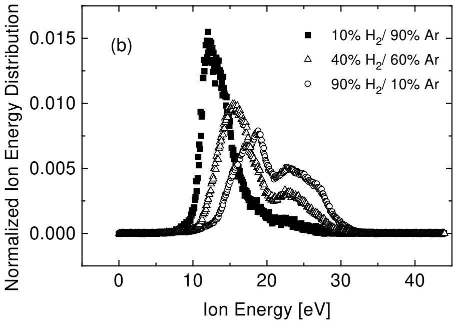


20 mTorr

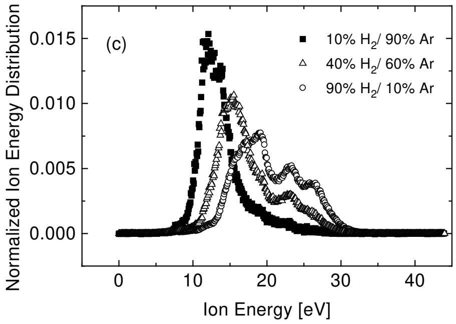
Orkudreififöll jóna í súrefnisrafgasi við 565 W



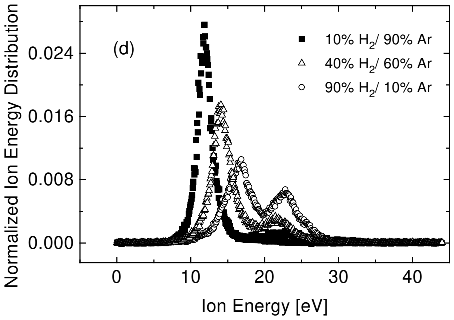
H^+



H_2^+

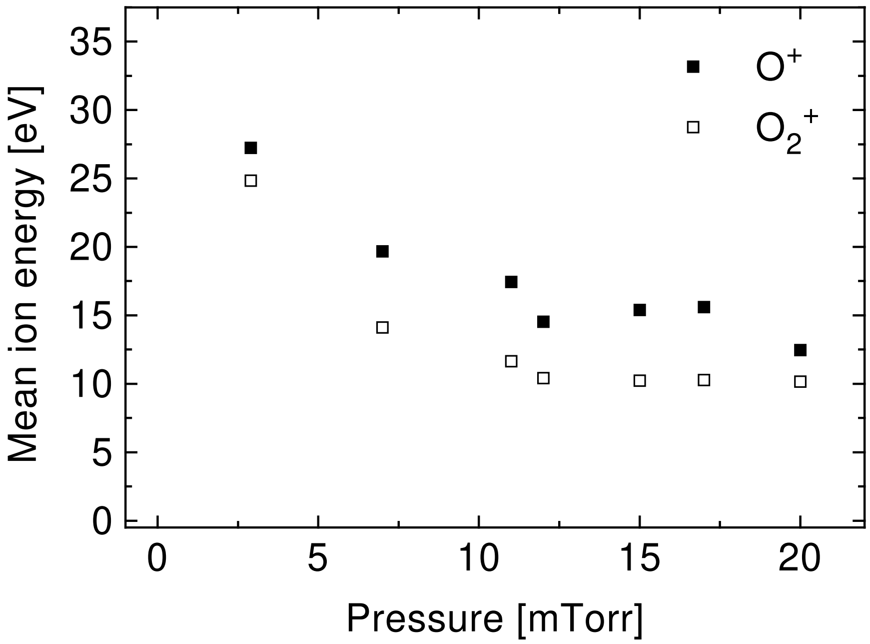


H_3^+



Ar^+

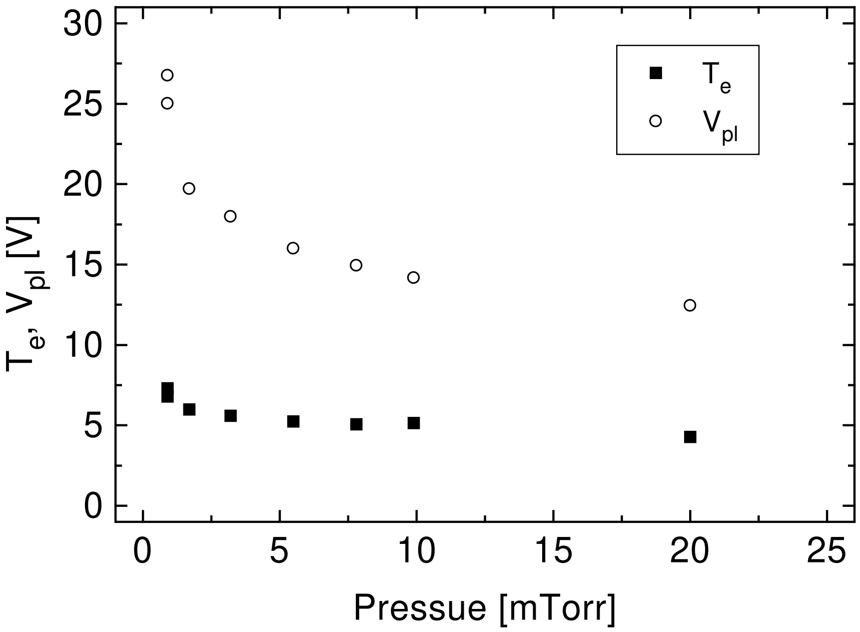
Orkudreififöll jóna í H_2/Ar rafgasi við 20 mTorr



Meðalorka O^+ og O_2^+ jóna í súrefnisrafgasi við 565 W mæld sem fall af gasþrýstingi í flatri spanafhleðslu

Orka jóna

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



Rafgasmætti og rafeindahitastig í H_2/Ar rafgasi við 380 W og 30 % Ar innihald mælt sem fall af gasþrýstingi í flatri spanafhleðslu

Samantekt

- Farið var yfir helstu kennistærðir rafgass
- Fjallað var um meðalrúmmálslíkan sem einfalda leið til að lýsa rafgasefnafræðinni
- Fjallað var um Langmuirnema og notkun þeirra
- Sýndar voru niðurstöður mælinga á orkudreifingu jóna frá spanafhleðslu