
Veikt jónað rafgas: Kennistærðir og notkun

eftir

Jón Tómas Guðmundsson



RH-23-99

Science Institute
University of Iceland

Veikt jónað rafgas: Kennistærðir og notkun

Jón Tómas Guðmundsson,
Raunvísindastofnun Háskólans,
Dunhaga 3,
IS-107 Reykjavík

25. nóvember 1999

Útdráttur

Rafgas er ýmist full jónað eða veikt jónað. Veikt jónað rafgas er framkallað í rafdrifnum afhleðslum, þar sem rafdrifin jónun viðheldur rafgasinu í æstæði. Í veikt jónuðum afhleðslum eru rafeindirnar ekki í varmajafnvægi við jónir, hlutlaus atóm eða sameindir gassins. Rafgasafhleðslur gegna lykilhlutverki í hálfleiðaraiðnaðinum, sem tæki til að æta og rækta hálfleiðara og rafsvara. Skoðaðar verða kennistærðir rafgassins, rafeindaþéttleiki, rafeindahitastig, rafgasmætti og orkudreifing jóna og rafeinda, og bornar saman fyrir hefðbundna rýmdarafhleðslu og flata spanafhleðslu. Orkudreifing rafeinda rafgassins ræður miklu um jónun og efnafræði gassins og áhrif árekstra rafeinda við atóm jónir og sameindir. Orka og orkudreifing jóna hefur áhrif á gæði ræktaðra húða og orkuríkar jónir geta valdið skemmdum á smárásam.

Plasma is either fully ionized or weakly ionized. Weakly ionized plasma discharges are driven electrically and the electrically driven ionization sustains the plasma in steady state. In weakly ionized plasma discharges the electrons are not in thermal equilibrium with ions, gas atoms or gas molecules. Plasma discharges play a key role in semiconductor manufacturing as tools to etch and deposit semiconductors and dielectrics. We will discuss the plasma parameters, electron density, electron temperature, plasma potential and ion- and electron energy distributions, and compare the conventional capacitive rf discharge and the planar inductive discharge. The electron energy distribution is crucial in determining the ionization and the plasma chemistry and the effects of collisions of electrons with neutral gas atoms and molecules. The ion energy and the ion energy distribution have effect on the quality of deposited thin films and energetic ions can cause damages to integrated circuits during plasma processing.

1 Inngangur

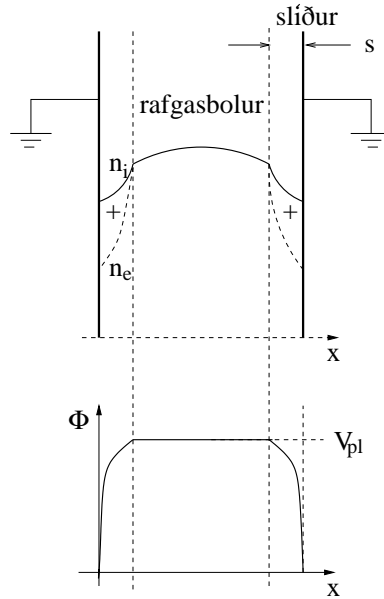
Rafgas og rafgasafhleðslur hafa verið viðfangsefni eðlisfræðinga frá því um miðja síðustu öld. Rafgas er hlut- eða full jónað gas sem inniheldur rafeindir, jónir, hlutlausar frumeindir og sameindir. Nú á dögum gegna rafgös veigamiklu hlutverki í framleiðslu smárása [1, 2]. Rafgas úr sameindagösum og blöndum þeirra gegna lykilhlutverki í að ná fram æskilegum ætingar- og ræktunarhraða við framleiðslu smárása. Þannig er súr-efnisrafgas notað til að fjarlægja ljósviðnámslag [3] og til oxunar og ræktunar á þunnum oxíðum [4, 5] og kísill er ættur í rafgösum sem innihalda flúor og klór [6]. Notkun rafgasa er eina færa leiðin til að æta út þau smágerðu hálfleiðaratól sem í dag eru ráðandi í nútíma rafeindatækni.

Samtímis því að þvermál kísilskífunnar hefur vaxið úr 25 mm árið 1965 í bráðum 300 mm hafa tólin farið minnkandi. Kennilengdir smára eru nú < 250 nm og þykkt gáttar á MOS smára er 2 – 3 nm. Lögmál Moore's, sem segir að fjöldi smára á hverju móti tvöfaldist á hverjum 18 mánuðum, hefur verið ráðandi í þróun hálfleiðaraiðnaðarins undanfarna fjóra áratugi [7]. Til að mynda megi tól sem eru minni en 300 nm hefur þurft að auka jónaþéttleika rafgassins sem er notað við ætinguna. Skipt hefur verið úr rýmdarafhleðslu, sem vinnur við tiltölulega háan gasþrýsting og lágan jónaþéttleika, yfir í afhleðslur sem vinna við lægri gasþrýsting og gefa hærri jónaþéttleika [8]. Þessum árangri hefur verið náð með nýjum afhleðslum í mismunandi útfærslum [9]. Þar á meðal eru spanafhleðsla [10], helicon [11, 12] og hringhraðalafhleðslur (ECR) [13].

Eiginleikum rafgass er lýst með hitastigi hvernar agnar og þéttleika hennar. Sérhver ögn hefur tiltekið jafnvægishitastig. Veikt jónað rafgas er drifið rafrænt og álagt afl hitar frekar upp rafeindirnar, sem eru léttari og hreyfanlegri en jónir. Rafeindir, jónir og hlutlausar eindir eru því ekki í varmajafnvægi. Helstu kennistærðir rafgass eru, rafeindaþéttleiki n_e , jónaþéttleiki n_i , og rafeindahitastig T_e , sem er mælikvarði á meðalorku rafeinda í gasinu. Rafgas, sem er nærhlutlaust ($n_i \approx n_e$), tengist yfirborðum um jákvætt hlaðið lag, nefnt slíður. Slíðrið myndast næst veggjum afhleðslunnar, þegar rafeindirnar, sem eru orkuríkari og hreyfanlegri en jónirnar, tapast í vegginn (sjá mynd 1). Slíðrið hefur tiltekna þykkt s , sem ræðst einkum af rafeindaþéttleika rafgassins. Á milli rafgasbolsins og yfirborðsins myndast mætti, rafgasmættið, V_{pl} vegna mismunandi þéttleika jóna og rafeinda í slíðrinu. Ef gefnar eru stýristærðirnar, gasþrýstingur p , afl P_{abs} (eða spennu V_{rf}), driftíðni ω , og stærð afhleðslunnar R og L þá fýsir okkur að vita þéttleika jóna og atóma, orkudreifingu jóna og stefnu og orkudreifingu rafeinda. Hér verða skoðaðar kennistærðir rafgassins: Rafeindaþéttleiki, rafeindahitastig, rafgasmætti og orkudreifing jóna og rafeinda. Þessar kennistærðir verða síðan bornar saman fyrir hefðbundna rýmdarafhleðslu og flata spanafhleðslu. Orkudreifing rafeinda rafgassins ræður miklu um jónun gassins og áhrif árekstra rafeinda við atóm, jónir og sameindir og þar af leiðandi efnafræði rafgassins.

2 Afhleðslur

Á fyrri hluta 20. aldar voru afhleðslur einkum notaðar til að skoða leiðni og niðurbrot í gasi, útgeislun rafeinda og örvun frumeinda og sameinda með árekstrum við

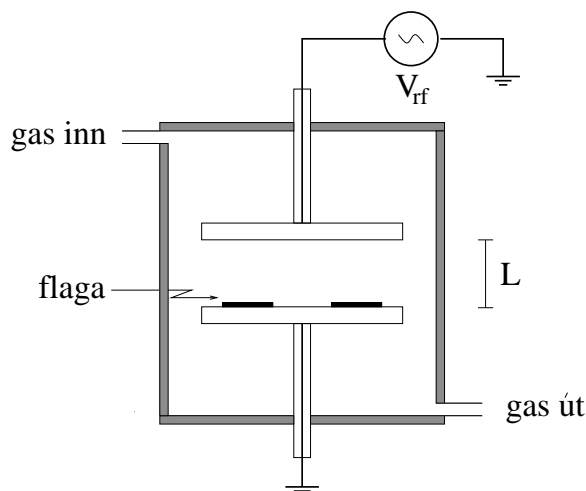


Mynd 1: Þéttleiki jóna, n_i , rafeinda, n_e , og mætti Φ í afhleðslu. Slíður af þykkt s myndast næst veggjum klefans þegar rafeindirnar, sem eru orkurikari og hreyfanlegri en jónirnar, tapast í vegginn.

rafeindir. Á síðari hluta aldarinnar hafa afhleðslur verið nýttar sem ljósgjafar, leysar og í efnisframleiðslu, einkum í rafeindaiðnaði.

Rafgas var fyrst notað í hálfleiðaraiðnaðinum undir lok sjöunda áratugarins til að eyða ljósviðnámslagi. Ræktun rafsvara hófst í byrjun áttunda áratugarins og fljótlega æting rafsvara [3]. Til þessa voru notaðar rýmdarafhleðslur í ýmsum útfærslum. Dæmigerð rýmdarafhleðsla (rf tvistur, plötubéttir) er sýnd á mynd 2. Hefðbundin rýmdarafhleðsla byggir á því að gas milli tveggja rafskauta er jónað. Hún er jafnan drifin með rf spennu $V_{rf} \approx 100 - 1000$ V við 13.56 MHz. Rafeindabéttleiki gassins ræðst af útslagi rf spennunnar. Gas þrýstingur er 10 – 100 mTorr og fjarlægð milli skauta $L \approx 2 - 10$ cm. Þéttleiki rafgassins sem myndast er á bilinu $10^9 - 10^{10}$ cm^{-3} . Þegar rækta eða æta á hálfleiðara er einni eða fleiri skífum komið fyrir á öðru skautinu. Slíður af þykkt 1 – 10 mm myndast við bæði skautin [14] og nálega helmingur rf spennunnar fellur yfir hvort slíður. Jónir fá hröðun yfir slíðrið að skífunni, sem til meðhöndlunar er. Orka jónanna er því $\mathcal{E}_i \approx V_{rf}/2 \approx 50 - 500$ V. Rýmdarafhleðslur voru ráðandi í iðnaðinum í rúma tvo áratugi.

Í fyrstu voru nokkrar skífur meðhöndlaðar í einu. Í upphafi tíunda áratugarins var farið að meðhöndla aðeins eina skífu í einu. Jafnframt var þvermál hvernar skífu aukið í 150 mm. Til að viðhalda framleiðni þurfti að auka agnabéttleika jóna, hvarfgjarnra frumeinda og sameinda og fá betri stýringu á framleiðslunni. Þess vegna voru þróaðar nýjar afhleðslur fyrir rafeindaiðnaðinn [8, 9]. Lægri gasþrýstingur leiðir til lengri meðalsnertu jóna og þess vegna betri stefnuhneigðar jóna við ætingu og ræktun, sem er



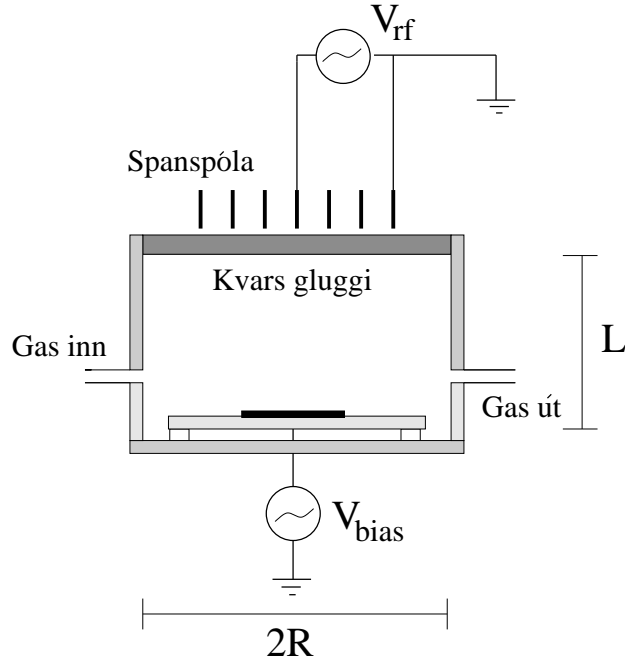
Mynd 2: Hin hefðbundna rýmdarafhleðsla. Rf spennna, 100 – 1000 V við 13.56 MHz, sem er lögð á skautin jónar gasið. Einni eða fleiri skífum er komið fyrir á öðru skautinu.

nauðsynlegt þegar tólin minnka.

Spanafhleðsla og hringhraðalafhleðsla hafa 1 – 2 stærðargráðum hærri jónapétteleika en hefðbundnar rýmdarafhleðslur. Orka jóna er um stærðargráðu lægri (og stýranleg). Í þessum nýju afhleðslum er óháð stjórn á jónapétteleika og orku jóna. Jónapétteleika er stjórnað með affi til spanspólu (eða örbylgjuaffi í hringhraðalafhleðslu) og orku jóna er stjórnað með rf spennu sem lögð er á sýnahaldarann og er óháð jónun gassins. Spanafhleðsla er nú ráðandi í rafeindaiðnaðinum.

Spanafhleðslan er tiltölulega einfalt tæki til þess að mynda rafgas. Spanafhleðslur eru ýmist sívalningslaga eða flatar. Sívalningslaga spanafhleðsla er oftast gasfyllt kvars rör, sem um er vafið spanspólu. Farið var að nota flatar spanafhleðslur til framleiðslu smárása með rafgasi í lok níunda áratugarins [15, 16]. Mynd 3 sýnir uppbyggingu flatrar spanafhleðslu. Gasið er fætt inn í lofttæmdan klefa og 1 - 3 cm þykkur kvars gluggi er á milli gassins og spólu sem knýr afhleðsluna. Spólan er flöt og spírallaga. Rf spennan (um og yfir 1000 V) sem drífur spanspóluna veldur einnig rafstöðumætti í rafgasinu. Þetta rafstöðumætti kemur af stað afhleðslunni, sem þaðan í frá er viðhaldið með spanhrifum. Spanafhleðslur, sem notaðar eru í rafeindaiðnaðinum, eru gjarnan við lágan þrýsting (< 50 mTorr) og byggðar þannig að $L/R \leq 1$.

Upphaf spanafhleðslunnar er rakið til W. Hittorf [17], sem 1884 framkallaði straum um gas án skauta. J. J. Thomson fékk fljótlega áhuga á hugmyndinni og endurtók tilraunina [18]. Jafnframt setti hann fram tilgátu um að afhleðslan væri knúin algerlega með spanhrifum milli spanspólunnar og straumlykkju, sem myndaðist í leiðandi gasinu. N. Tesla gerði svipaðar tilraunir og ályktaði að afhleðslan stafaði eingöngu af rafstöðumætti á milli póla spólunnar [19, 20]. Hugmynd Thomson var að líta mætti á spanafhleðslu sem spennu, þar sem spanspólan væri forvafið og braut straumsins um



Mynd 3: Uppsetning spanafhleðslu. Gasið er fætt inn í lofttæmdan klefa og 1 - 3 cm þykkur kvars gluggi er á milli gassins og spólu sem knýr afhleðsluna. Spólan er flöt og spírallaga. Afl til spanspólu stýrir jónun gassins en orku jóna er stýrt með spennunni V_{bias} sem lögð er á sýnahaldarann.

leiðandi gasið væri bakvafið. Á milli forvafs og bakvafs verkaði gagnspan [18]. Þessi hugmynd er grunnurinn að nýlegum líkönum um aflflutning í spanafhleðslu [21, 22, 23]. Fjöldi tilrauna var framkvæmdur á næstu áratugum til að leita svara við spurningunni um það hvernig myndun og viðhaldi spanafhleðslu væri háttáð [24, 25, 26]. Að lokum var það MacKinnon sem sýndi fram það, að rafstöðumætti þarf til að koma afhleðslu af stað í gasinu, sem síðan er viðhaldið með spanhrifum [27]. Hin síðari ár hefur áhugi á breytingunni frá rafstöðuhætti til spanháttar aukist. Við breytinguna verður stökk í rafeindapéttleika [28] og ljósútgeislun [29] og orkudreififall rafeindanna tekur breytingum [30]. Þá eru greinileg heldnihrif þegar farið er á milli þessara háttá [29, 31]. Hér er enn mikið verk óunnið til að ná fullum skilningi á þessum umskiptum.

Í spanhætti framkallar spólan spansvið sem hefur segulflæðisþéttleikabættina $B_r(r, z)$ og $B_z(r, z)$ og rafsviðspátt $E_\theta(r, z)$. Segulsviðið spanar rafsvið samkvæmt lögmáli Faraday

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \int \frac{d\mathbf{B}}{dt} \cdot d\mathbf{S} \quad (1)$$

og ef gert er ráð fyrir sívalningshnitum þá er rafsviðið gefið með

$$E_\theta(r) = -\frac{1}{r} \int_0^r r' \dot{B}_z(r') dr' \quad (2)$$

Tafla 1: Dæmigerðar kennistærðir rafgass í hefðbundinni rýmdarafhleðslu og flatri spanafhleðslu.

	Rýmdarafhleðsla	Spanafhleðsla
Prýstingur [mTorr]	10 – 1000	0.5 – 50
Afl [W]	50 – 2000	100 – 5000
Driftíðni [MHz]	0.05 – 13.56	0 – 2450
Rafeindapéttleiki [cm ⁻³]	10 ⁹ – 10 ¹⁰	10 ¹⁰ – 10 ¹²
Rafeindahitastig [eV]	1 – 5	2 – 7
Orka jóna [V]	200 – 1000	< 100
Meðalsnerta jóna [mm]	0.03 – 3	1 – 30
Slíðurþykkt [mm]	1 – 10	0.3 – 1

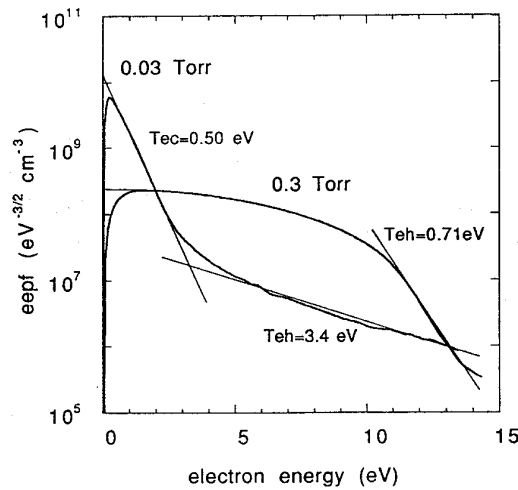
Þar sem r og r' eru radíar, mældir frá miðás kerfisins. Afþrotningurinn frá rafsviðinu til rafgassins á sér stað innan skindýptar næst spólunni [32]. Hann á sér stað ýmist með árekstrum agna eða með slembihitun [33, 34].

3 Kennistærðir rafeinda

Við ætingu, ræktun og íbætingu á hálfleiðandi efnum við framleiðslu á smárum er samsetning rafgassins, einkum jónapéttleiki, mikilvægur þáttur. Ætingarhraðinn, valvísi ætingar, ræktunarhraði og íbótar ferlið ræðst af eiginleikum rafgassins, gasþrýstingi, affi til afhleðslunnar, hlutföllum frumefna í gasinu og jónapéttleika rafgassins. Orkudreifing rafeinda ræður miklu um jónun gassins og áhrif árekstra rafeinda við atóm jónir og sameindir. Þar af leiðandi gegnir orkudreifing rafeindanna lykilhlutverki í rafgasefnafraðinni. Samspil jóna og hvarfgjarnra frumeinda og sameinda er virkara í ætingu og ræktun, en jónir og hvarfgjarnar eindir einar sér. Með Langmuir nema er mögulegt að ákvarða rafeindapéttleika n_e , rafeindahitastig T_e , rafgasmætti V_{pl} og orkudreififall rafeindanna [35].

3.1 Rýmdarafhleðsla

Rafeindapéttleiki í rýmdarafhleðslu er gjarnan á bilinu $10^9 - 10^{10}$ cm⁻³. Mynd 4 sýnir líkindadreifingu orku rafeinda í rýmdarafhleðslu [36]. Í orkudreifingu rafeinda í argon afhleðslu sést mikill fjöldi (~ 90 %) lágorku rafeinda sem hafa rafeindahitastig um 0.3 eV. Líkindadreifingunni má lýsa með summu tveggja Maxwell dreifinga við lægri gasþrýsting, $p < 400$ mTorr, með tvö mismunandi rafeindahitastig $T_{ec} \approx 0.3$ eV og $T_{eh} \approx 3$ eV [37]. Með auknum gasþrýstingi $p > 500$ mTorr verða snögg umskipti og orkudreifingu rafeindanna verður best lýst með Druyvesteyn dreifingu og við það hækkar meðalorka rafeindanna í rafgasinu og rafeindapéttleiki fellur [37].



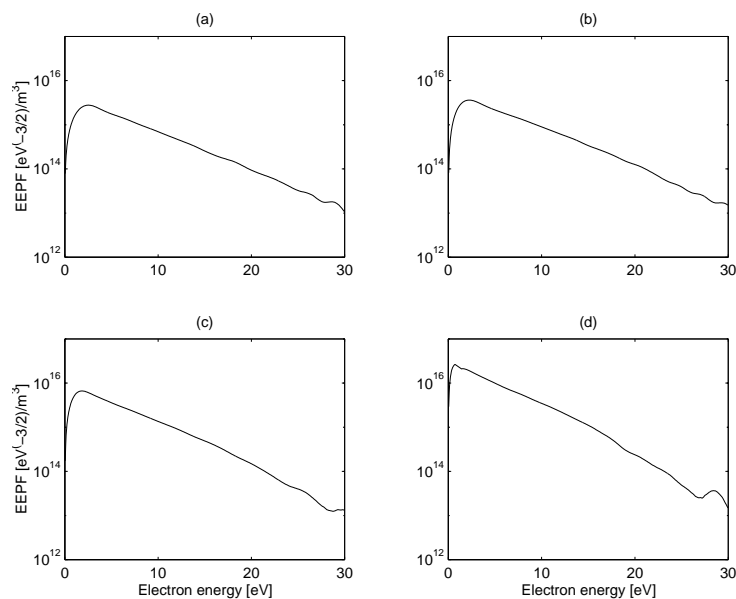
Mynd 4: Líkindadreifing orku rafeindanna (EPPF) í miðju argon rýmdarafhleðslu mæld með Langmuir nema við 30 og 300 mTorr þrýsting. Frá V. A. Godyak et al. J. Appl. Phys., **73** (1993) 3657.

3.2 Spanafhleðsla

Fyrir spanafhleðslu benda mælingar með Langmuirnema til þess að rafeindaþéttleikinn sé á bilinu $10^{10} - 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ og aukist línulega með auknu affi [38]. Godyak et al. [39, 40] fundu að orkudreiffalli rafeindanna var vel lýst með dreifingu Maxwells neðan við jónunarorku argons, en sneytt við hærri orku. Færri rafeindir finnast því við háa orku en búast mætti við ef um Maxwell dreifingu í orku rafeindanna væri að ræða. Orkudreiffalli rafeindanna er vel lýst með Maxwell dreifingu fyrir lágan gasþrýsting < 5 mTorr en verður betur lýst með Druyvesteyn dreifingu þegar þrýstingur er hækkaður [41, 42]. Mynd 5 sýnir líkindadreifingu orku rafeinda í O_2/Ar rafgasi í spanafhleðslu við 5 mTorr fyrir mismunandi blöndur af súrefni og argon í afhleðslunni [42]. Seo et al. [30] hafa nýlega sýnt fram á að ef spanafhleðsla er drifin með lágu inngangsaffi, þ.e. er í rafstöðuhætti, er orkudreifingu rafeindanna vel lýst með summu tveggja Maxwell dreifinga svipað og þekkt er fyrir rýmdarafhleðslu. Þegar affið er aukið og afhleðslan skiptir í spanhátt verður orkudreifingu rafeindanna vel lýst með Maxwell dreifingu neðan við jónunarorku argons.

4 Orkudreifing jóna

Mikilvægt er að þekkja orku jónanna og þéttleika þeirra er þær lenda á yfirborði skífu og hvernig orka þeirra er háð gasþrýstingi, affi til spólunnar, og öðrum kennistærðum rafgassins. Orka og orkudreifing jóna hefur áhrif á gæði ræktaðra húða og orkuríkar jónir geta valdið skemmdum á smárásam. Þess vegna er mikilvægt að þekkja orku jóna og geta stýrt henni óháð rafeinda- og jónaþéttleika í rafgasinu. Orka jóna, er þær

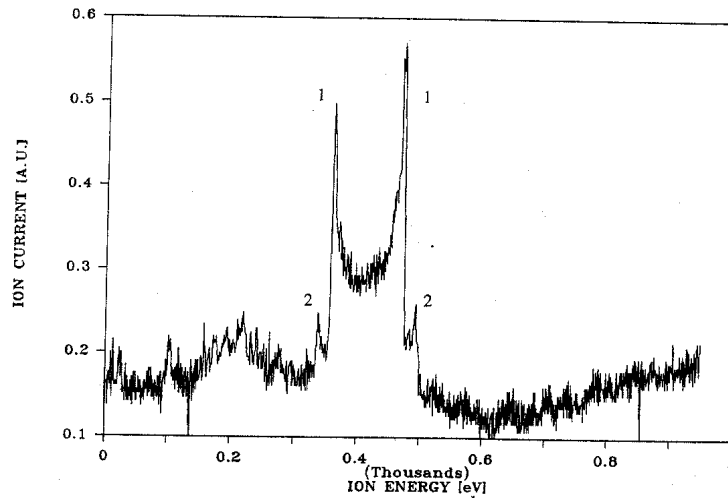


Mynd 5: Líkindadreifing orku rafeinda fyrir mismunandi O_2/Ar hlutföll við 5 mTorr, 400 W og gasflæði 25 sccm (a) 100 % O_2 , (b) 84 % $O_2/16$ % Ar, (c) 48 % $O_2/52$ % Ar og (d) 100 % Ar. Frá J. T. Gudmundsson et al. Plasma Sources Sci. Technol. **8** (1999) 22.

lenda á skifunni, er ákvörðuð af mættismuninum milli rafgassins og yfirborðs skifunnar, sem yfirleitt fellur yfir þunnt slíðrið [43]. Ef ferðalag jónanna um slíðrið tekur mikið styttri tíma, en sem nemur lotu rf drifspennunnar, þá fá þær hröðun sem svarar til augnabliksspennunnar yfir slíðrið. Þannig ræðst orka jónanna af hvar í lotu spennunnar þær koma inn í slíðrið. Topparnir tveir sem einkenna orkudreifinguna svara til mestu og minnstu spennu yfir slíðrið (þegar spennan breytist hægst) [43]. Ef ferðalag jóna um slíðrið tekur margar lotur þá svarar jónin meðaltals spennufallinu yfir slíðrið. Fram koma mjög skarpir toppar á jöðrum rófsins. Breidd rófsins er þá í réttu hlutfalli við hlutfall lotunnar og ferðatíma jónar um slíðrið sem og í öfugu hlutfalli við kvadratrót af massa jónarinnar. Með massagreini má rannsaka jónir í gasinu, hlutfallslegan þéttleika þeirra og orkudreifingu.

4.1 Rýmdarafhleðsla

Hefðbundinni rýmdarafhleðsla vinnur við tiltölulega háan gasþrýsting. Þar er meðalsnerta jóna stutt og rafeindaþéttleiki lágur. Lágur rafeindaþéttleiki leiðir til þykks slíðurs. Jónin rekst því títt á hlutlausar agnir á ferðalagi sínu um slíðrið. Dreifing kemur þess vegna fram í orku jónanna, sem oft er breið með fjölda brodda [44, 45, 46]. Mynd 6 sýnir orkudreifingu jóna í súfnisrafgasi í rýmdarafhleðslu við 1000 W og 2 mTorr [44]. Orka jóna er á bilinu 400 – 700 eV og tveir skarpir toppar á jöðrum rófsins. Orkudreifingin á mynd 6 er dæmigerð fyrir jónir sem svara meðaltals spennufalli yfir



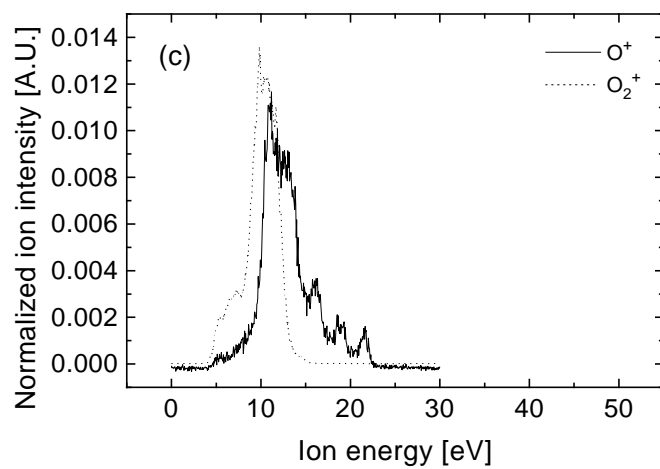
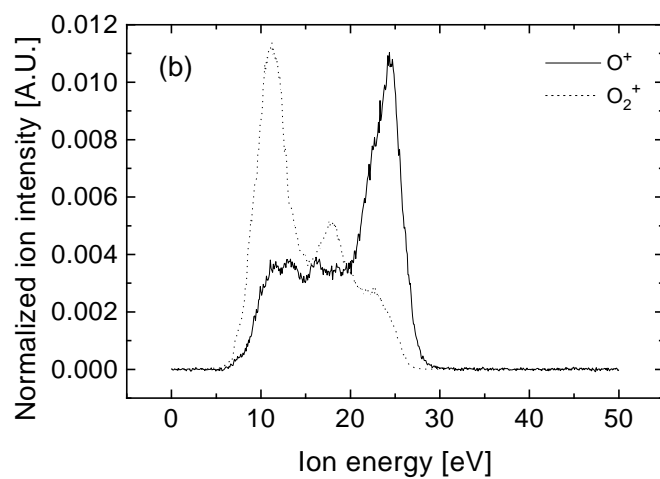
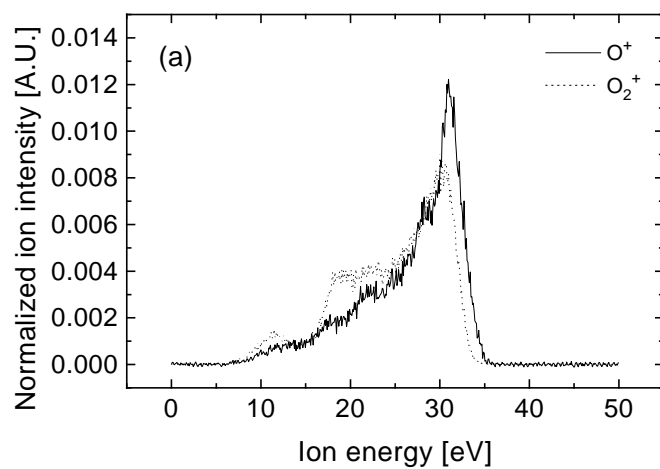
Mynd 6: Orkudreifing jóna frá súrefni í rýmdarafhleðslu við 1000 W og 2 mTorr þrýsting. Merki sjást um bæði (1) O_2^+ og (2) O^+ . Frá A. D. Kuypers and H. J. Hopman, J. Appl. Phys., **63** (1988) 1894.

slíðrið, þegar ferðalag jónanna um slíðrið tekur margar lotur [47]. Orkudreifingin fyrir O^+ jónir er að jafnaði breiðari en orkudreifingin fyrir O_2^+ jónir. Það er í samræmi við að breidd orkudreifingarinnar er háð massa jónar samkvæmt $\Delta\mathcal{E} \propto m_i^{-1/2}$ [48].

4.2 Spanafhleðsla

Hinar nýju afhleðslur vinna yfirleitt við háan rafeindapöttleika og lágan gasþrýsting. Með því fæst bæði hár ætingahraði og stefnuhneigðar jónir. Hár rafeindapöttleiki leiðir til þunns slíðurs. Þá er spennufallið yfir slíður þessara afhleðsla fremur lítið og þar með minni hröðun jóna er þær fara um slíðrið. Við þessi skilyrði er ferðalag jónarinnar um slíðrið í raun laust við árekstra við hlutlausar agnir, þar sem þykkt slíðursins er mun minni en meðalsnerta jóna (sjá töflu 1). Dreifing í orku jóna og horninu sem hún kemur undir að skífunni er því lágmörkuð. Orkudreifing jóna í súrefnisrafgasi í spanafhleðslu, sem er sýnd á mynd 7, er á bilinu 10 – 35 eV [49]. Orkudreifingin fyrir O^+ jónir er að jafnaði breiðari en orkudreifingin fyrir O_2^+ jónir. Meðalorka jóna fellur og breidd orkudreifingarinnar minnkar með auknum gasþrýstingi. Þegar gasþrýstingur er aukinn styttest meðalsnerta jóna og verður svipuð slíðurþykktinni. Þá verða árekstrar jóna og hlutlausra einda í slíðrinu. Við það myndast jónir, oft með tiltekna orku. Afleiðingar árekstra jóna og hlutlausra agna koma því fram sem broddar í orkurófinu eins og greinilega má sjá á mynd 7 (c). Í spanafhleðslu tekur ferðalagið um slíðrið um það bil eina lotu [49].

Jónunum er hraðað yfir slíðrið af rafgasmættinu sem hefur bæði dc og rf þátt. Orku



Mynd 7: Orkudreifing jóna frá súrefni í spanafhleðslu við 675 W mælt við (a) 3 mTorr (b) 7 mTorr og (c) 20 mTorr þrýsting.

jónanna er þær lenda á veggjum klefans (eða skifu) má þá lýsa með jöfnunni

$$\mathcal{E}_i = \frac{T_e}{2} + V_{pl} + \tilde{V}_{rf} \sin \omega t \quad (3)$$

þar sem $T_e/2$ er orkan sem samsvarar Bohm hraðanum, hraðanum sem jónirnar hafa er þær koma inn í slíðrið, V_{pl} er dc þáttur rafgasmættisins og \tilde{V}_{rf} er rf þáttur þess. Rf þáttur rafgasmættisins í spanafhleðslu í spanhætti er 3 – 5 V [50]. Í spanafhleðslu er því orka jónanna að mestu háð kennistærðum rafgassins, einkum rafeindahitastiginu. Í rýmdarafhleðslu er $\tilde{V}_{rf} \gg V_{pl}$ og þess vegna er \tilde{V}_{rf} ráðandi í hröðun jóna yfir slíðrið.

5 Samantekt

Fjallað hefur verið um rafgas og rafgasafhleðslur. Kennistærðir rafgass í hefðbundinni rýmdarafhleðslu og spanafhleðslu hafa verið bornar saman. Í spanafhleðslu eru engin rafskaut og há spenna er ekki notuð til að jóna gasið á sama hátt og í rýmdarafhleðslu. Segulflæðið frá spólunni spanar straum í gasinu sem jónar það og myndar rafgas. Orka jóna í rafgasinu er því nær óháð affi til spólunnar. Þéttleiki jóna og rafeinda er um stærðargráðu hærri í spanafhleðslu en hefðbundinni rýmdarafhleðslu sem leiðir til aukins ræktunar og ætingahraða við framleiðslu smárása. Þá vinna hinar nýju háþéttleikaafhleðslur við lægri gasþrýsting sem leiðir til lengri meðalsnertu jóna sem eru þá stefnuhneigðari.

Þakkir

Verkefnið var styrkt af Rannsóknarsjóði Íslands.

Heimildir

- [1] D. B. Graves, IEEE Transactions on Plasma Science **22**, 31 (1994).
- [2] N. Hershkowitz, IEEE Transactions on Plasma Science **26**, 1610 (1998).
- [3] D. L. Tolliver, in *VLSI Electronics: Microstructure Science, vol. 8*, edited by N. G. Einspruch and D. M. Brown (Academic Press, Orlando, 1984), pp. 1–24.
- [4] D. A. Carl, D. W. Hess, M. A. Lieberman, T. D. Nguyen, and R. Gronsky, Journal of Applied Physics **70**, 3301 (1991).
- [5] M. Kitajima, H. Kuroki, H. Shinno, and K. G. Nakamura, Solid State Communication **83**, 385 (1992).
- [6] D. L. Flamm, in *Plasma Processing of Semiconductors*, edited by P. F. Williams (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 1997), pp. 23–59.
- [7] R. R. Schaller, IEEE Spectrum **34** (6), 53 (1997).
- [8] M. A. Lieberman and R. A. Gottscho, in *Physics of Thin Films, vol. 18*, edited by M. Francombe and J. Vossen (Academic Press, New York, 1994), pp. 1 – 119.

- [9] P. Burggraaf, *Semiconductor International* 56 (May 1994).
- [10] J. Hopwood, *Plasma Sources Science and Technology* **1**, 109 (1992).
- [11] R. W. Boswell and F. F. Chen, *IEEE Transactions on Plasma Science* **25**, 1229 (1997).
- [12] F. F. Chen and R. W. Boswell, *IEEE Transactions on Plasma Science* **25**, 1245 (1997).
- [13] J. Asmussen, *Journal of Vacuum Science and Technology A* **7**, 883 (1989).
- [14] V. A. Godyak, R. B. Piejak, and B. M. Alexandrovich, *IEEE Transactions on Plasma Science* **19**, 660 (1991).
- [15] D. K. Coultas and J. H. Keller, European Patent, Publication No. 0 379 828 A2 (8. January 1990), 1990.
- [16] J. S. Ogle, U.S. Patent No. 4,948,458 (14. August 1990), 1990.
- [17] W. Hittorf, *Annalen der Physik und Chemie* **21**, 90 (1884).
- [18] J. J. Thomson, *Philosophical Magazine* **32**, 321 (1891).
- [19] N. Tesla, *The Electrical Engineer* **7**, 14 (July 1891).
- [20] N. Tesla, *The Electrical Engineer* **7**, 233 (August 1891).
- [21] R. B. Piejak, V. A. Godyak, and B. M. Alexandrovich, *Plasma Sources Science and Technology* **1**, 179 (1992).
- [22] V. A. Godyak, R. B. Piejak, and B. M. Alexandrovich, *Plasma Sources Science and Technology* **3**, 169 (1994).
- [23] J. T. Gudmundsson and M. A. Lieberman, *Plasma Sources Science and Technology* **7**, 83 (1998).
- [24] J. J. Thomson, *Philosophical Magazine* **4**, 1128 (1927).
- [25] J. S. Townsend and R. Donaldson, *Philosophical Magazine* **5**, 178 (1928).
- [26] H. U. Eckert, in *Proceedings of the Second Annual International Conference on Plasma Chemistry and Technology*, edited by H. Boenig (Technomic Publishing, Lancaster PA, 1986), pp. 171 – 202.
- [27] K. MacKinnon, *Philosophical Magazine* **8**, 605 (1929).
- [28] J. Amorim, H. Maciel, and J. Sudamo, *Journal of Vacuum Science and Technology B* **9**, 362 (1991).
- [29] U. Kortshagen, N. Gibson, and J. Lawler, *Journal of Physics D: Applied Physics* **29**, 1224 (1996).
- [30] S.-H. Seo, J.-I. Hong, and H.-Y. Chang, *Applied Physics Letters* **74**, 2776 (1999).

- [31] M. M. Turner and M. A. Lieberman, *Plasma Sources Science and Technology* **8**, 313 (1999).
- [32] J. T. Gudmundsson and M. A. Lieberman, *Plasma Sources Science and Technology* **7**, 1 (1998).
- [33] M. M. Turner, *Physical Review Letters* **71**, 1844 (1993).
- [34] V. Vahedi, M. A. Lieberman, G. DiPeso, T. D. Rognlien, and D. Hewett, *Journal of Applied Physics* **78**, 1446 (1995).
- [35] V. A. Godyak, R. B. Piejak, and B. M. Alexandrovich, *Plasma Sources Science and Technology* **1**, 36 (1992).
- [36] V. A. Godyak, R. B. Piejak, and B. M. Alexandrovich, *Journal of Applied Physics* **73**, 3657 (1993).
- [37] V. A. Godyak and R. B. Piejak, *Physical Review Letters* **65**, 996 (1990).
- [38] J. Keller, J. Forster, and M. Barnes, *Journal of Vacuum Science and Technology A* **11**, 2487 (1993).
- [39] V. A. Godyak, R. B. Piejak, and B. M. Alexandrovich, *Plasma Sources Science and Technology* **4**, 332 (1995).
- [40] V. A. Godyak and V. I. Kolobov, *Physical Review Letters* **81**, 369 (1998).
- [41] J. T. Gudmundsson, *Plasma Sources Science and Technology* **7**, 330 (1998).
- [42] J. T. Gudmundsson, T. Kimura, and M. A. Lieberman, *Plasma Sources Science and Technology* **8**, 22 (1999).
- [43] E. Kawamura, V. Vahedi, M. A. Lieberman, and C. K. Birdsall, *Plasma Sources Science and Technology* **8**, R45 (1999).
- [44] A. D. Kuypers and H. J. Hopman, *Journal of Applied Physics* **63**, 1894 (1988).
- [45] J. Liu and H. H. Sawin, *Journal of Applied Physics* **68**, 3916 (1990).
- [46] C. Wild and P. Koidl, *Journal of Applied Physics* **69**, 2909 (1991).
- [47] K. Köhler, D. E. Horne, and J. W. Coburn, *Journal of Applied Physics* **58**, 3350 (1985).
- [48] J. W. Coburn and E. Kay, *Journal of Applied Physics* **43**, 4965 (1972).
- [49] J. T. Gudmundsson, *Journal of Physics D: Applied Physics* **32**, 798 (1999).
- [50] M. Watanabe, D. M. Shaw, G. J. Collins, and H. Sugai, *Journal of Applied Physics* **85**, 3428 (1999).