

## Afbrigði segulspæta

Jón Tómas Guðmundsson<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Verkfræðideild Háskóla Íslands, Hjarðarhaga 2–6, IS-107 Reykjavík

<sup>2</sup> Raunvísindastofnun Háskólans, Dunhaga 3, IS-107 Reykjavík

Vefútgáfa: 10. nóvember 2004

**Ágrip** — Segulspætur eru mikilvægar í iðnaði og grunnrannsóknunum sem tól til ræktunar þunnra húða. Með segulspætu má rækta þunnar húðir úr bæði málmum og einangrurum. Í segulspætu er jónum hraðað úr rafgasi að skotmarki og atómum spætt úr því. Skotmarkið ásamt gasinu í klefanum ákvarðar efnasamsetningu húðarinnar. Með hvarfaspætu má rækta oxíð, nítríð og karbíð. Fjallað er um grunnuppbyggingu spæta og segulspæta. Ræddar eru takmarkanir á segulspætutækninni og reifaðar þær lausnir sem þróaðar hafa verið til endurbóta svo sem púlsun aflagjafa, ójafnvægi í segulflæði og aukna jónun spætra atóma.

### 1. Inngangur

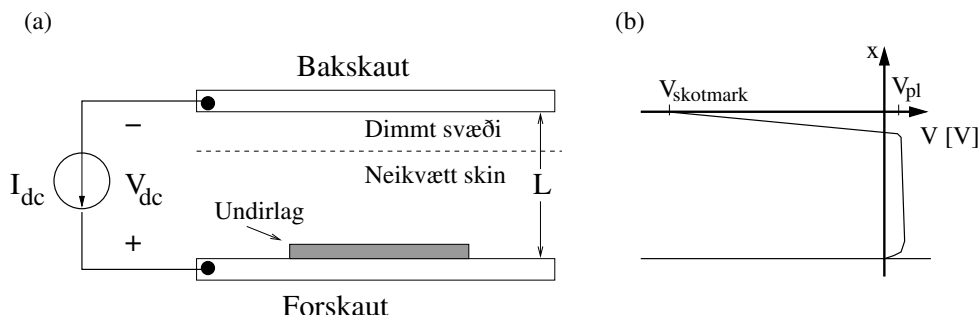
Segulspætur gegna lykilhlutverki í mörgum greinum iðnaðar sem tól til ræktunar þunnra húða. Segulspætur eru einnig afar mikilvægar í rannsóknunum í eðlisvísindum sem og til þróunar í ýmsum geinum verkfræði, svo sem efnis- og rafeindatekni. Þunnar húðir á bol-efni (undirlag) gefa eiginleika sem ekki eru fyrir hendi í bolefninu. Einnig má fá fram ýmsa eiginleika með því að rækta fjölmörg lög ólíkra efna, svonefndar yfirgrindur. Spætu er víða notuð við ræktun þunnra húða sem hafa nýja efnis- eða yfirborðseiginleika. Dæmi um slíkar húðir eru leiðandi, einangrandi eða hálfleiðandi lög í smárásun, segulefni, harðar húðir, núningsfletir, húðir með tiltekna ljóseiginleika, skrauthúðir, slitþolnar húðir og tæringarvörn. Hár ræktunarhraði hefur gert segulspætutæknina að einni mest notuðu aðferðinni til ræktunar þunnra húða hvort heldur sem ræktaður er rafsvari, málmur eða melmi. Í segulspætunni er jónum hraðað úr rafgasi að skotmarki og atómum spætt úr því (Chapin, January 1974; Waits, 1978). Skotmarkið ásamt gasinu í klefanum ákvarðar efnasamsetningu húðarinnar. Oftast er þó óhvarfgjarnt argon gas notað og skotmörkin ein ákvarða þá efnasamsetningu húðarinnar. Hægt er að spæta samtímis úr nokkrum skotmörkum og mynda melmi eða spæta til skiptis frá tveimur eða fleiri skotmörkum og mynda lög ólíkra húða og rækta yfirgrindur (Ólafsson and Arnalds, 1999). Við ræktun leiðandi húða er gjarna

notaður jafnspennugjafi (dc) til framkalla spennu á milli skauta afhleðslunnar.

Það eru ýmsar takmarkanir á notkun hefðbundinna dc segulspæta. Bakskautsspennan og straumurinn um afhleðsluna eru tengdar stærðir, svo þegar spennan er aukin til að auka þéttleika rafgassins eykst straumurinn um afhleðsluna verulega. Annað vandamál er misleitni í spætuninni og myndun raufar í skotmarkið sem hefur í för með sér verri nýtingu skotmarksins og ræktaða húðin getur orðið misleit. Ræktun einangrandi húðar í segulspætu er umtalsvert erfiðari en ræktun málmhúða. Þá er ýmist spætt úr einangrandi skotmarki eða málm-skotmarki. Þegar spætt er úr samsettu- eða málm-skotmarki og súrefni, nitri eða metan er blandað við rafgasið nefnist það hvarfaspætu. Nokkur spætukerfi hafa verið hönnuð til að komast fyrir þessar takmarkanir (Kelly and Arnell, 2000; Schneider et al., 2000). Sumt hefur verið leyst með púlsun afhleðslunnar en annað með viðbótar jónun á spættu atómum eða með aukinni eða stýrðri hremmingu (e. capture) rafeinda og/eða jóna.

Undanfarin ár hafa verið þróaðar segulspætur við Raunvísindastofnun Háskólans (Ólafsson and Arnalds, 1999). Ræktun þunnra málmhúða í segulspætu er þegar komin vel á veg og ræktaðar hafa verið ofurþunnar húðir úr melmi (Ívar Meyvantsson, 2003) sem og yfirgrindur (Reynaldsson, 2003).

Hér verða rædd takmörk segulspætutækninnar og reifuð þau afbrigði segulspæta sem þróaðar hafa ver-



**Mynd 1.** (a) Dæmigerðar dc spætur eru oftast flatar, sívalar argon afhleðslur sem drifnar eru með fastri dc straumlind. Hér er gert ráð fyrir að hlutfall radía skotmarksins og fjarlægðar á milli skauta sé minna en einn. (b) Mættisdreifing á svæðið milli skautanna. Forskautið er jarðtengt og nær öll spennan fellur yfir slíðursvæðið næst bakskautinu.

ið til endurbóta svo sem púlsun aflagjafa, ójafnvægi í segulflæði og aukna jónun spætra atóma. Margar útfærslur eru til af spætum og segulspætum en hér verður eingöngu fjallað um flatar afhleðslur með skífulaga skotmörk.

## 2. Spætun

Spætun í sinni einföldustu mynd fæst við að leggja háa spennu milli tveggja rafskauta í gasfylltum klefa (Vossen and Cuomo, 1978). Dæmigerð dc afhleðsla til spætunar málmatóma er sýnd á mynd 1 (a). Þær eru oftast flatar, sívalar argon-afhleðslur, drifnar með fastri dc straumlind. Fjarlægð milli bakskauts og forskauts er gjarna á bilinu 100–200 mm. Rafsviðið myndar veikt jónað rafgas á milli skautanna. Efra skautið, sem er bakskaut, er skotmark fyrir spætun með jákvæðum jónum úr rafgasinu. Mættið á milli skautanna er sýnt á mynd 1 (b). Gert er ráð fyrir að forskautið sé jarðtengt og að bakskautið drifið frá neikvæðu skauti aflagjafans. Rafgasbolurinn flýtur ofan við jörð við rafgas-mættið,  $V_{pl}$ , og yfir hann er lítið spennufall vegna hárrar leiðni. Þetta þýðir að nær öll spennan fellur yfir slíðursvæðið næst bakskautinu. Sterkt rafsvið á slíðursvæðinu gefur jónum mikla hröðun yfir slíðrið, sem veldur háorku-jónahríð og spætun bakskautsins. Undirlagið sem spættu atómin falla á er á neðra skautinu, forskautinu. Atómin sem spætt eru úr skotmarkinu leggjast á undirlagið og mynda húð. Sérhver jónandi árekstur losar rafeind og til að viðhalda afhleðslunni þurfa að losna fleiri rafeindir en þær sem tapast úr rafgasinu. Mikilvæg rafeindalind til viðhalds rafgassins er útgeislun lausnarrafeinda frá yfirborði bakskautsins. Stöðugur straumur lausnarrafeinda frá

bakskautinu heldur rafgasinu við. Vegna þessa þarf vinnubrýstingur afhleðslunnar að vera nægilega hár til að lausnarrafeindirnar nái ekki árekstralaust að forskautinu eða til jarðtengdra flata. Þessi þrýstingur er hærri en heppilegt er til að ná fram ásættanlegum ræktunarhraða vegna árekstra spættu atómanna við atóm gassins. Þess vegna er dc spætun aðeins nothæf á þröngu þrýstingsbili, við 5 – 100 mTorr (Vossen and Cuomo, 1978). Helstu gallar við dc spætun eru að ræktunin er fremur hæg og til að viðhalda rafgasinu þarf mjög háa spennu 1 – 5 kV.

## 3. Segulspætur

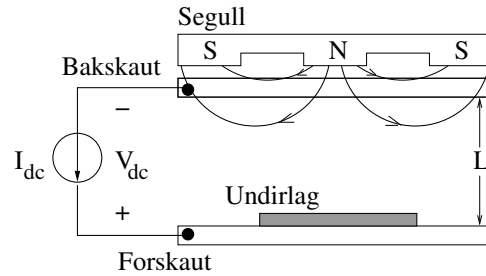
Segulspætan var þróuð til að bæta spætunina og auka ræktunarhraðann (Chapin, January 1974). Grunnhugmyndin að segulspætunni er sú sama og að dc spætunni og felst í því að jónum er hraðað að bakskauti og atómum er spætt úr því. Til að auka jónun rafgassins næst bakskautinu er segulsvið lagt hornrétt á rafsviðið milli skautanna. Hlutverk segulsviðsins er að hremma rafeindir og halda þeim nálægt bakskautinu. Við það lengist dvalartími og brautarlengd rafeindanna í rafgasinu næst bakskautinu og árekstrum fjölgar. Hefðbundin flöt segulspæta er sýnd á mynd 2. Seglum er komið fyrir aftan við bakskautið, einum fyrir því miðju og hinum við jaðar þess. Segulsviðslínurnar ganga út um miðju bakskautsins og inn í skautið aftur á jöðrunum. Segulsviðið er myndað með síseglum, rafseglum eða hvorutveggja. Skotmarkið sem spætt er úr er skífa, gjarna 2 til 10 mm að þykkt og 50–150 mm í þvermál, sem fest er við vatnskælda koparplötu. Í hefðbundinni dc segulspætu er bakskautinu haldið við fasta

neikvæða spennu. Sýnahaldarinn og/eða jarðtengd yfirborð klefans gegna oftast hlutverki forskauts.

Ræktunarhraði í segulspætu er háður spætunarhraðanum frá skotmarkinu, efnasamsetningu skotmarks og stærð þess, fjarlægð milli skotmarks og undirlags og hraða spættu agnanna í afhleðslunni. Spætunarhraðinn er aftur háður hreyfiorku og straumbéttleika jónanna. Hreyfiorka jónanna er háð spennunni sem lögð er á bakskautið en straumbéttleikinn ræðst af bakskautsstraumnum. Margfeldi straums og spennu er afl svo að spætunarhraðinn frá bakskautinu er í réttu hlutfalli við meðal aflþéttleika. Ofhitnun og bráðnun skotmarks setja aflþéttleikanum efri nýtileg mörk. Gasþrýstingur í afhleðslunni hefur tvenns konar áhrif: Annars vegar hefur hann áhrif á rafgasþéttleikann sem hækkar með auknum gasþrýstingi og hins vegar fellur ræktunarhraðinn vegna dreifingar spætttra atóma. Ræktunarhraði nær þess vegna hágildi sínu við tiltekinn gasþrýsting, sem gjarna liggur á bilinu 2–40 mTorr.

Afhleðsla í hefðbundinni dc segulspætu er jafnan framkölluð við 1–20 mTorr gasþrýsting og 300–700 V spennu á bakskauti. Þetta gefur 5–50 mA/cm<sup>2</sup> straumbéttleika og 1–40 W/cm<sup>2</sup> aflþéttleika. Rafeindapéttleiki og þar með jónapéttleiki nokkrum cm neðan við bakskautið er af stærðarþrepiinu 10<sup>16</sup> m<sup>-3</sup> og eykst með vaxandi gasþrýstingi. Rafeindapéttleikinn er afar misleitur við bakskautið og tekur hágildi þar sem segulsviðslínurnar eru samsíða yfirborði skotmarksins en fellur að jöðrum og miðju bakskautsins (Field et al., 2002). Háigildi rafeindapéttleikans getur verið allt að stærðarþrepi herra en þéttleikinn yfir miðju bakskautsins. Rafeindapéttleikinn fellur með fjarlægð frá bakskautinu og verður einsleitari.

Það eru ýmsar takmarkanir á notkun hefðbundinna dc segulspæta. Fyrst er að telja innbyrðis tengsl bakskautsspennu og straums um afhleðsluna. Aukinn ræktunarhraði kallar á hærri spennu sem gefur meiri rafgasþéttleika. Þetta veldur meira jónaflæði sem aftur eykur straum frá bakskautinu. Eitt af meginvandamálunum við notkun segulspætu er myndun raufar í skotmarkið. Vegna þessa nýtist aðeins um 25–30% skotmarksins til spætunar. Skotmarkið kvernast og rofnar fyrst og fremst af spætun með orkumiklum jónum. Kvörnun skotmarksins er misleit þar sem dreifing jónanna framan við skotmarkið er ekki einsleit. Misleitni segulsviðsins sem veldur því að spætunarhraðinn er

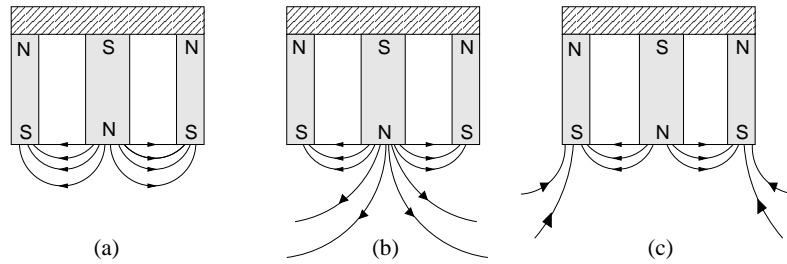


**Mynd 2.** Hefðbundin dc segulspæta. Seglum er komið fyrir aftan við bakskautið, öðru segulskautinu fyrir því miðju og hinu við jaðarinn. Segulsviðslínurnar ganga út um miðju bakskautsins og inn í bakskautið aftur á jöðrum þess. Segulsviðið hremmir rafeindirnar næst bakskautinu og þar myndast rafgas með tiltölulega háum rafeindapéttleika. Eftir Lieberman and Lichtenberg (1994).

misleitur yfir bakskautinu. Þetta veldur því að nýtni skotmarksins minnkar sem og að ræktaða húðin verður misleit. Einsleitni húðarinnar má bæta með því að snúa undirlaginu eða seglunum, eða hafa segulsviðið breytilegt með tíma.

#### 4. Segulspæta í ójafnvægi

Jónaflæði til yfirborðs sýnis er fremur lítið í segulspætum. Þetta er æskilegur eiginleiki ef spættu atómin ein bera nægilega hreyfiorku til að besta kristallagerð húðar eða þegar halda þarf upphitun húðar vegna jónahríðar í lágmarki. En oft er æskilegt að auka eða stýra jónahríð inn á húðina. Hafa ýmsar leiðir verið reyndar til að auka jónaflæðið. Flestar byggja þær á ójafnvægi í segulflæði um innri og ytri hluta skotmarksins (Window and Savvides, 1986a,b). Hefðbundin flöt segulspæta er sögð vera í jafnvægi ef styrkur segulflæðisins um innri og ytri pólfleti er jafn. Þetta er sýnt á mynd 3 (a). Ef þetta skilyrði er uppfyllt eru rafeindir hremmdar rétt við bakskautið. Styrking eða deyfing segulflæðisins um innri eða ytri pólfleti veldur ójafnvægi í segulrásinni. Í segulspætu af gerð I fara ekki allar segulflæðislínurnar sem eiga upptök sín í miðjupólnum um jaðarpólinn eins og sjá má á mynd 3 (b). Þá er lítið jóna og rafeindaflæði að undirlaginu. Í segulspætu af gerð II fara ekki allar segulflæðislínurnar frá jaðarpólnum um miðjupólinn eins og sést á mynd 3 (c). Með þessu fæst meira flæði jóna og rafeinda að undirlaginu. Með því að breyta segulflæðisþéttleikanum meðan á ræktun stendur má stýra jóna- og rafeindaflæði að undirlaginu. Til að auka enn jónaflæðið



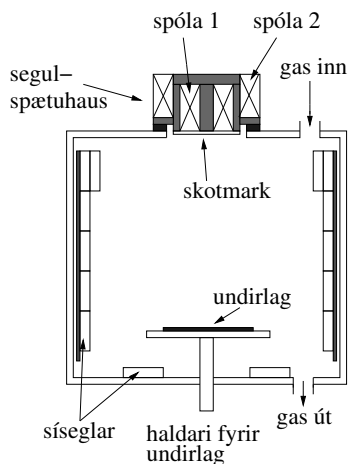
**Mynd 3.** Þrjú tilfelli af segulhönnun segulspætu. (a) hefðbundin segulspæta, og segulspæta í ójafnvægi (b) af gerð I og (c) gerð II sem gefa mismunandi segulflæðismynstur.

að undirlaginu má beita fjölpólasegulum til að halda jónunum frá veggjum klefans (Kadlec et al., 1990). Þá er sísegulum raðað á innra byrði klefans á milli skotmarks og undirlags eins og sjá má á mynd 4.

## 5. Ræktun rafsvara

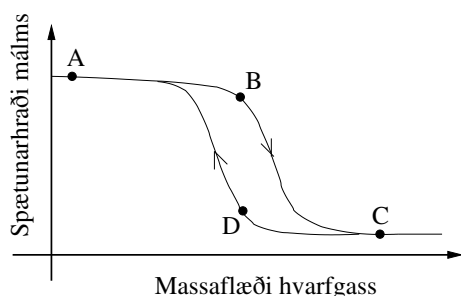
Hvarfaspættun er það nefnt þegar hvarfgjörnu gasi er bætt við óhvarfgjarna argon gasið við spættun. Hvarf spættu atómanna og hvarfgjarna gassins myndar samefna húð. Við hvarfaspættun er ræktaða húðin samsett og hefur eiginleika sem eru ólíkir skotmarkinu. Með hvarfaspættun eru einkum ræktað oxíð, nítríð og karbíð. Þá er súrefni, nitri eða metani bætt í argon afhleðsluna til að mynda megi samsetta húð frá málms-

skotmarki. Hvarfaspættun er einnig notuð til að hafa áhrif á efnahlutföll ræktaðrar húðar þegar spætt er úr samsettu skotmarki. Þetta stafar af því að við ræktun samsettrar húðar er tilhneiging til skorts á rafneikvæða frumefninu í húðinni. Ókostur ræktunar frá samsettu skotmörkum er að þau eru ekki jafn hrein og þétt og málmskotmörk. Þá eru þau lélegir varmaleiðarar sem takmarkar hámarksafþéttleika sem leggja má á bakskautið. Ræktun samsettra húða með hvarfaspættun frá málmskotmarki er tiltölulega erfið í stýringu (Berg et al., 1987). Þetta er útskýrt með mynd 5 sem sýnir heldniferil í sambandi spættunarhraða málmatóma og massaflæðis hvarfgjarna gass. Þegar málmskotmarkið er spætt með hreinu argon (punktur A á mynd 5), er spættunarhraðinn tiltölulega hár. Þegar flæði hvarfgjarna gassins er aukið helst spættunarhraðinn hár þar til punkti B er náð. Þá er aðloðun hvarfagna gassins við skotmarkið orðin meiri en spættunin. Skotmarkið er þá sagt eitruð og ræktunarhraðinn fellur verulega (punktur C), þar sem jónahríðin fer í að spæta samsetta lagið af, frekar en að spæta út málmatóm úr undirliggjandi málminum. Ef flæði hvarfgjarna gassins er minnkað aftur viðhelst eitrunin þar til punkti D er náð. Þá er spættunarhraðinn aftur orðinn meiri en aðloðunarhraði hvarfgjörnu agnanna og skotmarkið nær að hreinsa sig og spættunarhraðinn verður aftur hár.



**Mynd 4.** Flæði jóna og rafeinda að undirlaginu er stýrt með breytilegum segulflæðisþéttleika neðan við skotmarkið. Segulflæðinu er stýrt með straum til rafsegla. Sísegulum er svo raðað á innra byrði klefans á milli skotmarks og undirlagsins til að halda jónunum frá veggjum klefans.

Ýmis vandamál koma upp vegna uppsöfnunar hleðslu á skotmarkinu. Eins og áður sagði þá vex gjarna einangrandi lag á yfirborð skotmarksins. Ljósbugi getur myndast þegar jákvæð hleðsla safnast á yfirborð þessa einangrandi lags á skotmarkinu. Þetta hefur verið leyst með því að leggja rf spennu á segulspættuna (Jones and Logan, 1989) eða með því að púlssa dc spennuna (Schiller et al., 1993). Spættun með rf spennu er þó fremur hægsvirk sér í lagi þegar ræktað er frá einangrandi skotmarki. Ósamhverf tvíþóls dc spætt-

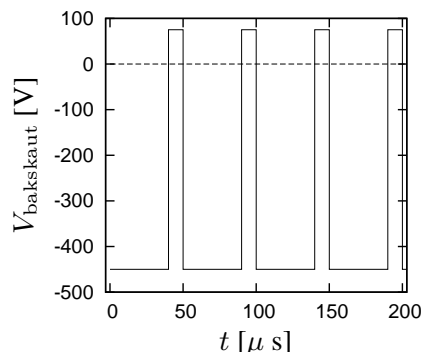


**Mynd 5.** Dæmigerð hegðan spætnarhraða málmis í hvarfa-spætnun, sem fall af flæði hvarfgjarns gass þegar flæði argons er haldið föstu.

un var þróuð til ræktunar rafsvarahúða með hvarfa-spætnun úr leiðandi skotmarki. Púlsun segulspætnunnar með 10–250kHz tíðni dregur verulega úr myndun ljósboga. Dæmigert bylgjuform spennunnar er sýnt á mynd 6. Skotmarkið er þá spætt við dæmigerða spennu á bakskautið (400–500 V) í tiltekinn tíma. Þessi tími ákvarðast af því að uppsöfnuð hleðsla nái ekki að valda niðurbroti og ljósboga. Síðan er lögð á jákvæð spenna í stuttan tíma til að reka hleðsluna af yfirborðinu. Þetta ferli er sýnt á mynd 7 fyrir ræktun á áloxíði frá ál skotmarki þar sem súrefni er blandað í argon rafgasið. Áloxíðlag myndast á skotmarkinu. Þetta áloxíðlag er þá eins og rafsvári í plötupétti með bakskautið sem annað skautið og rafgasið hitt skautið. Þegar neikvæð spenna er lögð á skotmarkið safnast jákvæð hleðsla á yfirborð einangrandi lagsins eins og sýnt er á mynd 7 (a). Þegar skautun spennunnar er snúið við dregst neikvæð hleðsla að yfirborði einangrarans (sjá mynd 7 (b)). Þegar skautun spennunnar er breytt á ný er jákvætt hlöðnum jónum hraðað að yfirborðinu og þeir hreinsa í burtu einangrandi lagið.

### 6. Aukin jónun

Við spætnunina losna einkum hlutlaus atóm frá yfirborði bakskautsins. Ef þessi atóm eru jónuð á ferð sinni frá bakskautinu, má hraða þeim að ræktunarflötinum með því að leggja á hann neikvæða dc spennu. Það hefur ýmsa kosti að jóna spættu atómin. Þannig má hafa áhrif á orku og stefnu innkomandi agna að yfirborði ræktaðrar húðar (Rossnagel and Hopwood, 1994). Gæði húðarinnar verða meiri, stýring á hvarfgirni og ræktun á flókin undirlög og í djúpar og mjóar raufar er möguleg. Þetta er einkum mikilvægt í nútíma rafeindatækni þar sem rækta þarf málmleiðara og sveimþrösk-

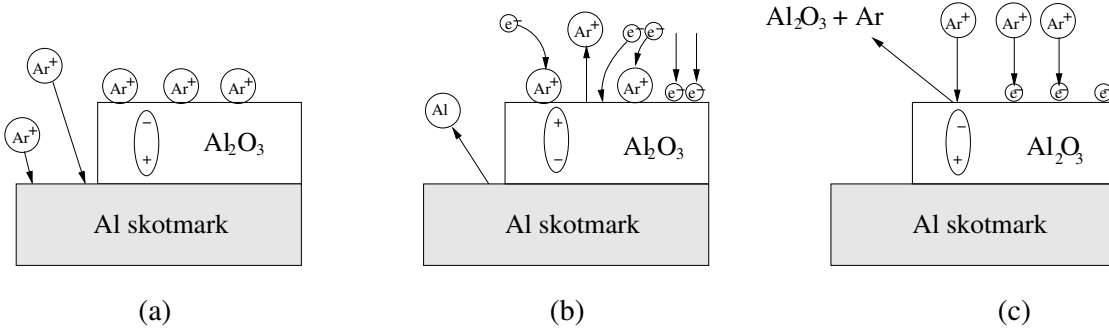


**Mynd 6.** Bylgjuform spennunar frá púlsuðum dc aflgjafa. Skotmarkið er þá spætt við dæmigerða neikvæða spennu á bakskautið (400–500 V) í tiltekinn tíma og síðan er lögð á jákvæð spenna í stuttan tíma til að reka hleðslu af yfirborðinu.

ulda í sífellt smærri byggingareiningar. Ein leið er að bæta spanspólu inn í segulspætna, umhverfis eða neðan við bakskautið eins og sjá má á mynd 8 (Rossnagel and Hopwood, 1994; Wang et al., 1999). Spanspólan er drifin með rf spennu ( $f = 13.56$  MHz). Með spanspólunni næst umtalsverð aukning í jónun málmatóma. Gasþrýstingur er aukinn til að lengja tímann sem það tekur spættu atómin að ferðast til undirlagsins. Hlutfall málmjóna af spættu atómum getur þá verið 80–90% (Rossnagel and Hopwood, 1994). Þetta er mun hærra jónunarhlutfall heldur en jónunarhlutfall argon rafgassins þar sem jónunarmætti málmatóma er umtalsvert lægra en fyrir argon. Nýlega hafa verið gerðar tilraunir með að beita hvarfaspætnun í segulspætnu með málmskotmarki og spanspólu (Matsuda et al., 2003). Einnig hefur verið þróuð tækni til að auka jónun með örbylgjum sem með segulsviðinu skapar hringhraðalhermu rafeindanna (Yonesu et al., 2002).

### 7. Púlsuð segulspæta

Í hefðbundinni dc segulspætnu takmarkast aflþéttleikinn af upphitun á skotmarkinu. Þetta er vegna þess að nær öll orka jákvæðra jóna sem hraðað er að skotmarkinu breytist í varma. Nýlega hófust tilraunir með það að senda spennupúls á milli skauta segulspætnu í þeim tilgangi að auka jónaþéttleika rafgassins (Kouznetsov et al., 1999; Macák et al., 2000). Segulspætan er þá drifin með púls-spennugjafa sem getur gefið púlssa sem eru allt að 2.4 MW (2000 V og 1200 A) að afli og eru endurteknir með tíðninni 50 Hz með púlsvídd 50–100  $\mu$ s. Með slíkum púls á bakskaut segulspæt-



**Mynd 7.** Spenna og hleðsla á skotmarkinu fyrir ræktun á álóxiði frá ál skotmarki með súrefni blandað í argon rafgasið. (a) Álóxiðlag myndast á skotmarkinu. Þegar neikvæð spenna er lögð á skotmarkið safnast jákvæð hleðsla á yfirborð einangrandi lagsins. (b) Þegar skautun spennunar er snúid við dregst neikvæð hleðsla að yfirborði einangrarans. (c) Þegar skautun spennunar er breytt á ný er jákvætt hlöðnum jónum hraðað að yfirborðinu og þær hreinsa í burtu einangrandi lagið. Eftir Sellers (1998).

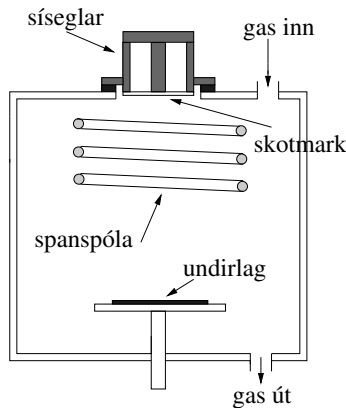
unnar hefur náðst mjög mikill þéttleiki jóna og rafenda. Rafeindaþéttleikinn nær hágildi sínu um 100–150  $\mu\text{s}$  eftir að púlsinn hefst, allt að  $4 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$  (Guðmundsson et al., 2001, 2002). Þetta er um tveimur stærðarþrepum hærri rafeindaþéttleiki en mælist í hefðbundnum dc segulspætum. Á mynd 9 sést hvernig rafeindaþéttleiki í afhleðslunni breytist með tíma frá upphafi háafspúls við mismunandi þrýsting argons í afhleðslunni. Rafeindaþéttleikapúlsarnir ferðast síðan með jöfnum hraða frá skotmarkinu (Guðmundsson et al., 2002; Gylfason, 2003). Við hærri gasþrýsting (ofan við 10 mTorr) kemur fram toppur í rafeinda-

þéttleikanum 300–500  $\mu\text{s}$  eftir upphaflega toppinn sem kemur fram við púlsinn (sjá mynd 9).

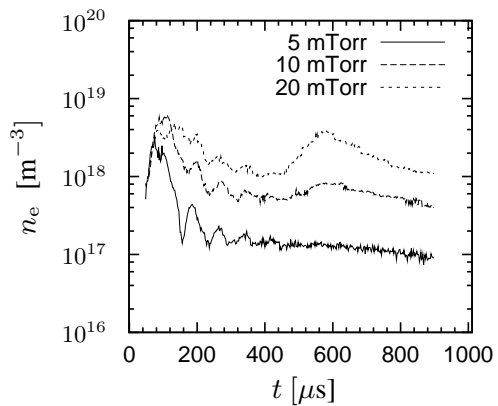
Með þessari aðferð fæst afar há hlutfallsleg jónun í afhleðslunni eða 40–70% (Macák et al., 2000). Einnig er nýting skotmarksins betri en fyrir hefðbundna dc segulspætu (Kouznetsov et al., 1999). Hér er því ný tækni sem bæði gefur háan rafgasþéttleika og háa hlutfallslega jónun spættu agnanna. Þessi tækni ætti því að henta vel til ræktunar ræktunar málmleiðara í mjóar og djúpar raufar.

**8. Lokaorð**

Fjallað hefur verið um búnað og tækni til ræktunar þunnra húða með segulspætu. Segulspætutæknin hef-



**Mynd 8.** Spanspóla í segulspætu. Spanspólunni er komið fyrir á milli skotmarksins og undirlagsins. Um spóluna fer straumur á 13.56 MHz tíðni.



**Mynd 9.** Rafeindaþéttleiki  $n_e$  sem fall af tíma frá upphafi púls 9 cm neðan við skotmarkið. Spennupúlsinn er 100  $\mu\text{s}$  langur og meðalafi 300 W. Frá Guðmundsson et al. (2002).

ur náð gríðarlegri útbreiðslu í iðnaði sem og í rannsóknum og verið í stöðugri þróun þau þrjátíu ár sem liðin eru síðan hún kom fram á sjónarsviðið. Með segulspætu má rækta þunnar húðir úr bæði málum eða einangrurum og mynda yfirgrindur. Með hvarfaspætu má rækta oxíð, nítríð og karbíð. Fjallað var um grunnuppbyggingu spæta og segulspæta, ræddar takmarkanir á segulspætutækninni og þær lausnir sem þróaðar hafa verið til endurbóta svo sem púlsun aflgjafa, ójafnvægi í segulflæði og aukna jónun spætra atóma.

## Pakkir

Uppbygging tækjabúnaðar fyrir ræktun þunnra húða með segulspætu hefur verið styrkt af Bygginga- og tækjakaupasjóði Rannís, Rannsóknasjóði Háskóla Íslands og Nýsköpunarsjóði Námsmanna. Að auki hafa einstök verkefni verið styrkt úr Vísindasjóði Rannís, Rannsóknarnámssjóði og Sænska Vísindaráðinu.

## Heimildir

- S. Berg, H.-O. Blom, T. Larsson, and C. Nender. Modelling of reactive sputtering of compound materials. *Journal of Vacuum Science and Technology A*, 5:202–207, 1987.
- John S. Chapin. The planar magnetron. *Research/Development*, pages 37–40, January 1974.
- D. J. Field, S. K. Dew, and R. E. Burrell. Spatial survey of a magnetron plasma sputtering system using a Langmuir probe. *Journal of Vacuum Science and Technology A*, 20:2032–2041, 2002.
- J. T. Gudmundsson, J. Alami, and U. Helmersson. Evolution of the electron energy distribution and the plasma parameters in a pulsed magnetron discharge. *Applied Physics Letters*, 78:3427–3429, 2001.
- J. T. Gudmundsson, J. Alami, and U. Helmersson. Spatial and temporal behavior of the plasma parameters in a pulsed magnetron discharge. *Surface and Coatings Technology*, 161:249–256, 2002.
- Kristinn Björgvin Gylfason. *Observation of solitons in a pulsed magnetron sputtering discharge*. Master's thesis, University of Iceland, June 2003.
- Fletcher Jones and Joseph Logan. High-rate reactive sputter deposition of aluminum oxide. *Journal of Vacuum Science and Technology A*, 7:1240–1247, 1989.
- S. Kadlec, J. Musil, and W.-D. Münz. Sputtering systems with magnetically enhanced ionization for ion plating of TiN films. *Journal of Vacuum Science and Technology A*, 8:1318–1324, 1990.
- P. J. Kelly and R. D. Arnell. Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications. *Vacuum*, 56:159–172, 2000.
- V. Kouznetsov, K. Macák, J. M. Schneider, U. Helmersson, and I. Petrov. A novel pulsed magnetron sputter technique utilizing very high target power densities. *Surface and Coatings Technology*, 122:290–293, 1999.
- M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg. *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*. John Wiley & Sons, New York, 1994. pp. 466
- K. Macák, V. Kouznetsov, J. M. Schneider, U. Helmersson, and I. Petrov. Ionized sputter deposition using an extremely high plasma density pulsed magnetron discharge. *Journal of Vacuum Science and Technology A*, 18:1533–1537, 2000.
- Y. Matsuda, Y. Koyama, K. Tashiro, and H. Fujiyama. MgO deposition using reactive ionized sputtering. *Surface and Coatings Technology*, 435:154–160, 2003.
- Ívar Meyvantsson. *Ultra-thin conductors and insulators synthesis and characterization*. Master's thesis, University of Iceland, June 2003.
- Sveinn Ólafsson and Unnar B. Arnalds. Spætu og ræktun með segulspætu. ritstjóri Ari Ólafsson, *Eðlisfræði á Íslandi IX*, bls. 143–152, Reykjavík, 1999. Eðlisfræðifélag Íslands.
- Guðmundur Reynaldsson. *Hydrogen in metallic superlattices*. PhD thesis, University of Iceland, August 2003.
- S. M. Rosnagel and J. Hopwood. Metal ion deposition from ionized magnetron sputtering discharge. *Journal of Vacuum Science and Technology B*, 12:449–453, 1994.
- S. Schiller, K. Goedicke, J. Reschke, V. Kirchhoff, S. Schneider, and F. Milde. Pulsed magnetron sputter technology. *Surface and Coatings Technology*, 61:331–337, 1993.
- J. M. Schneider, S. Rohde, W. D. Sproul, and A. Matthews. Recent developments in plasma assisted physical vapour deposition. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 33:R173–R186, 2000.
- J. Sellers. Asymmetric bipolar pulsed DC: the enabling technology for reactive PVD. *Surface and Coatings Technology*, 98:1245–1250, 1998.
- J. L. Vossen and J. J. Cuomo. Glow discharge sputter deposition. In J. L. Vossen and W. Kern, editors, *Thin Films Processes*, pages 11–73. Academic Press, New York, 1978.
- R. K. Waits. Planar magnetron sputtering. In J. L. Vossen and W. Kern, editors, *Thin Films Processes*, pages 131–173. Academic Press, New York, 1978.
- W. Wang, J. Foster, T. Snodgrass, A. E. Wendt, and J. H. Booske. An rf sustained argon and copper plasma for ionized physical vapor deposition of copper. *Journal of Applied Physics*, 85:7556–7561, 1999.

- B. Window and N. Savvides. Charged particle fluxes from planar magnetron sputtering sources. *Journal of Vacuum Science and Technology A*, 4:196–202, 1986a.
- B. Window and N. Savvides. Unbalanced dc magnetrons as sources of high ion fluxes. *Journal of Vacuum Science and Technology A*, 4:453–456, 1986b.
- Akira Yonesu, Hiroki Takemoto, Makoto Hirata, and Yasumasa Yamashiro. Development of a cylindrical DC magnetron sputtering apparatus assisted by microwave plasma. *Vacuum*, 66:275 – 278, 2002.

**Summary:** Conventional dc magnetron sputtering is ideal for depositing thin metallic films. Compounds such as oxides and nitrides must be deposited with reactive sputtering in which a metal target is sputtered inside a discharge of reactive gas. The reactive process has required the development of more sophisticated sputtering systems. Conventional magnetron sputtering processes suffer from fundamental problems such as low target utilization, target poisoning and poor deposition rates for dielectric materials. Electrical instabilities or arcs cause process instability. A major drawback of the conventional magnetron discharge is the decrease of the ion flux arriving at the substrate with increased target-to-substrate distance. For a typical magnetron there is an interdependence of the target voltage and target current. Increased deposition rate requires increased target voltage to achieve a higher plasma density. This leads to a higher ion flux, which in turn increases the target current. Another problem is the formation of racetrack in the cathode target. Due to this only about 25–30% of the target is normally used during sputtering. Several sputtering systems have been designed to overcome these obstacles. Some of these problems have been alleviated by pulsing the applied voltage, others have been solved by additional ionization by rf or microwave power or increased magnetic confinement. Pulsing is either asymmetric bipolar pulsing or unipolar high power pulsing depending on the application.

**Um höfundinn:** Jón Tómas Guðmundsson er dósent í rafmagns- og tölvuverkfræði við verkfræðideild Háskóla Íslands. Hann lauk prófi í rafmagnsverkfræði 1989 og M.S. prófi í eðlisfræði 1991 frá Háskóla Íslands og Ph.D. í kjarnorkuverkfræði frá Kaliforníuháskóla í Berkeley 1996.

---

Raunvísindastofnun Háskólans  
Dunhaga 3, IS-107 Reykjavík  
tumi@hi.is

*Móttekin: 21. júní 2004*