

---

# Vakumpārklājumu tehnoloģija

---

Jānis Erdmanis, Arnis Katkevičs

2015. gada 7. novembrī

Date Performed ..... Oktobris  
Partners ..... Jānis Erdmanis, Arnis Katkevičs  
Instructor ..... Uldis Rogulis

## 1. Mērķis

Iepazīties ar virsmas uzklāšanas un vakuma tehnoloģijas pamatiem

## 2. Ievads

Dažādu tehnoloģisku vai zinātnisku pētījumu veikšanai ir nepieciešami augsts vakums. Lai iegūtu vakumu izmanto vakumsūkņus, kuri raksturojās ar spēju aizvadīt tilpumu kameras vides laika vienībā. Pretstatā tam dēļ spiediena starpības caur blīvēm, metāla porām, sūkņa atveres kamerā ieplūst apkārtējās vides gaiss, tādēļ spiediena vērtība ilgstošā sūkņa darbības režīmā tiecās uz galīgu vērtību. Šo galīgo vērtību sauc par robežspiedienu, kas industrijā tiek definēts, kā spiediena vērtība kura  $1h$  laikā nemainās par 10%.

Izotermiskos apstākļos daļiņu plūsmu varam definēt, kā

$$Q = \frac{d(pV)}{dt} = p \frac{dV}{dt} + V \frac{dp}{dt} \quad (1)$$

jo pēc Klapeirona vienādojuma  $dm/dt = \mu Q/RT$ . Šajā vienādojumā par tilpuma izmaiņu laikā mēs uzskatām sūkņa virzuļa tilpuma izmaiņu, jo procesu šajā brīdī uzskatām par kvazistatisku. Tā kā šo tilpuma izmaiņu laikā pie virzuļa nosaka tikai sūkņa darbības parametri tad mēs ievadam lielumu:

$$S_x = \left( \frac{dV}{dt} \right)_{A,p} \quad (2)$$

ko saucam par gāzes apjomu, kas izplūst caur šķērsgriezumam  $A$  ar spiedienu  $p$  laika vienībā jeb sūkņēšanas ātrumu.

Gadījumā, kad starp sūkni un kameru atrodas caurule gaisa viskozitātes dēļ sūkņēšanas ātrums no kameras kļūst mazāks  $S_{eff}$ . No tā, ka gāze caurulē neuzkrājas  $S_{eff}p_{in} = Q = S_x p_x$  un plūsma laminārā gadījumā raksturojas ar  $Q = U(p_{in} - p_x)$ , tad varam iegūt efektīvais atsūkņēšanas ātrums ir

$$S_{eff} = \frac{S_x U}{S_x + U} \quad (3)$$

kas ar teču lielumu nosaka kamerā iegūstamo robežspiedienu, jo tad  $dp/dt = 0$

$$p_r = Q_t / S_{eff} \quad (4)$$

Teču lielumu  $Q_t$  kamerā varam iegūt, ja sūkni apstādinām jeb  $dV/dt = 0$ , kas pēc eq. (1) un papildus iepludinām zināmu daudzumu gāzes  $Q_g$

$$Q_g + Q_t = V \frac{dp}{dt} \quad (5)$$

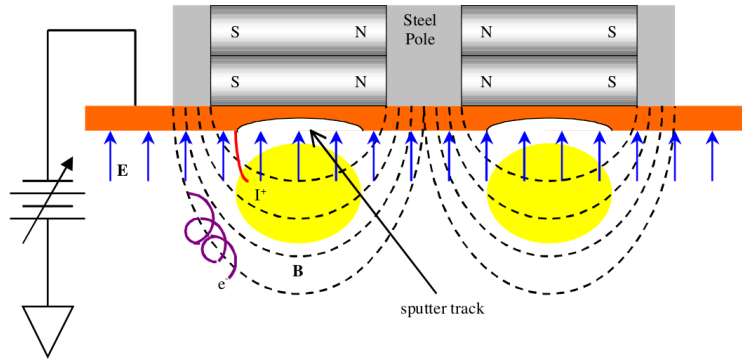
Šo lielumu tālāk varam izmantot, lai novērtētu efektīvo atsūkņēšanas ātrumu, ja papildus tecēm piepludinām argonu atsūkņēšanas laikā

$$S_{eff} = \frac{Q_t + Q_g}{p} \quad (6)$$

Šī eksperimentālā atkarība var būt noderīga, lai piemēram novērtētu cik lielas teces kamerai izveidojušās zinot robežspiedienu.

## 2.1. Mirdzizlāde

Magnetrons ir ierīce, kura ar elektriskā lauka palīdzību jonizē inerti gāzi, kura palīdz iztvaicēt tai priekšā esošo metālu. Tipiska magnetrona shēma parādīta fig. 3, kur elektriskais lauks paātrina  $Ar^+$  jonus uz mērķi, magnētiskais nodrošina elektronu ieslazdošanu tādēļādi samazinot nepieciešamās strāvas iztvaicēšanas veikšanai. Daļa no



1. att. Tipiska magnetrona shēma

elektroniem tomēr izkļūst no magnētiskā slazda un veido strāvu, kura būs atkarīga no sprieguma, spiediena, izmantotās inertās gāzes.

Ja šī magnetrona tuvumā novietojam paraugu, kura potenciāls ir pozitīvs attiecībā pret magnetronu, tad uz paraugu sāks plūst no magnetrona magnētiskā slazda izkļuvušie elektroni un neitrālie metāla atomi. Tā kā neitrālie atomi var izšauties no virsmas uz jebkuru patvaļīgu virzienu, tad izšautā intensitāte no magnetrona pakļauļās Lambēra likumam jeb pēc kosinusa likuma.

Ja paraugs ir tuvu magnetronam, tad lielākā daļa no izšautajiem metāla atomiem kondensējās. Tādā gadījumā varam apskatīt cik mētāla atomus varam izšaut uz paraugu ar vienu elektronu. Elektronu daudzums ir  $N_e = It/e$ , bet no substrāta kondensētā tilpuma metāla atomi ir  $N_{met} = \rho V N_A / \mu$  no kā:

$$\frac{N_{met}}{N_e} = \frac{\rho V N_A / \mu}{It/e} \quad (7)$$

No šīs attiecības, tad varam arī novērtēt darbu, kas nepieciešams, lai ar šādu procesu metāla atomi no mērķa izrautu

$$A = Ue \frac{N_e}{N_{met}} \quad (8)$$

ko var salīdzināt ar atoma virsmas enerģiju dotajam metāla mērķim.

### 3. Darba piederumi

- Vakumkamera ar tilpumu  $1m^3$  ar sasniedzamo robežspiedienu  $1 \cdot 10^{-5} Tori$
- Priekšvakuma sūkņi
- Turbomolekulārais sūknis T 1600 (Oerlicon Leybold Vacuum)
- Vakummetrs
- Gāzu iepludināšanas ierīce
- Mirdzizlādei - voltmeters, ampērmeters, magnetrons
- Paraugs ar virsmas izmēriem  $2 \cdot 5 \text{ cm}$

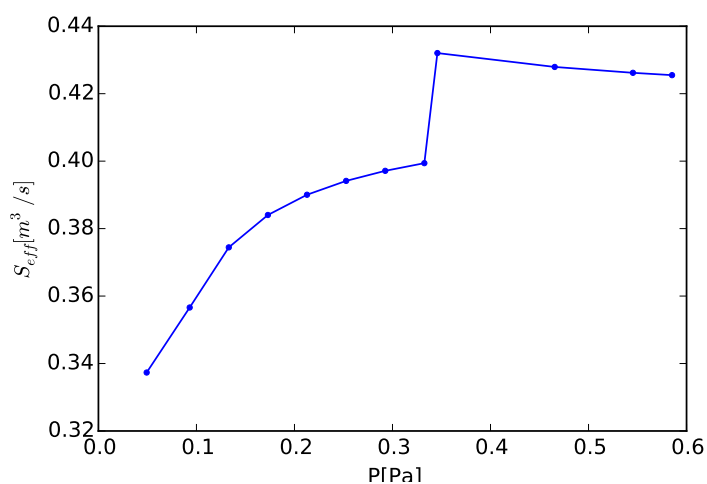
### 4. Darba uzdevumi

- Vakumkameras robežspiediena noteikšana
- Kameras teču lielumu noteikšana
- Vakumkameras efektīvās atsūkņēšanas ātruma noteikšana
- Mirdzizlādes voltampērliknes uzņemšana un paraugu apstrāde

### 5. Dati un apstrāde

Row	$p[\text{Tori} \cdot 10^{-5}]$	$Q[\text{sscm}]$	$P[\text{Pa}]$	QSi	$S_{eff}[\text{cm}^3/\text{s}]$
1	37.0	10.0	0.04921	0.0166	0.33733
2	70.0	20.0	0.0931	0.0332	0.356606
3	100.0	30.0	0.133	0.0498	0.374436
4	130.0	40.0	0.1729	0.0664	0.384037
5	160.0	50.0	0.2128	0.083	0.390038
6	190.0	60.0	0.2527	0.0996	0.394143
7	220.0	70.0	0.2926	0.1162	0.397129
8	250.0	80.0	0.3325	0.1328	0.399398
9	260.0	90.0	0.3458	0.1494	0.432042
10	350.0	120.0	0.4655	0.1992	0.427927
11	410.0	140.0	0.5453	0.2324	0.426187
12	440.0	150.0	0.5852	0.249	0.425496

2. tabula. Atsūkņēšanas ātruma atkarība no spiediena



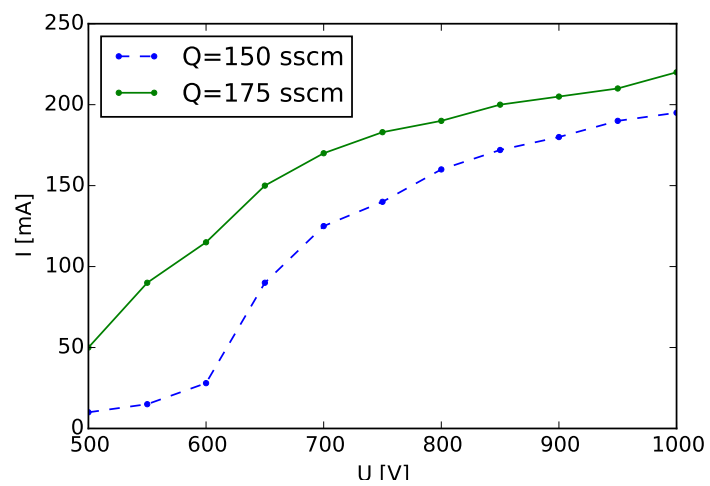
2. att. Efektīvā atsūkņēšanas ātruma atkarība no spiediena

Row	$t[\text{s}]$	$p[\text{Tori} \cdot 10^{-5}]$	$p[\text{Pa}]$	$Q[\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}]$
1	30.0	12.0	0.01596	0.000524552
2	60.0	26.0	0.03458	0.000568265
3	90.0	39.0	0.05187	0.000568265
4	120.0	53.0	0.07049	0.000579193
5	150.0	68.0	0.09044	0.000594492
6	180.0	81.0	0.10773	0.000590121
7	210.0	96.0	0.12768	0.000599488
8	240.0	110.0	0.1463	0.000601049
9	270.0	130.0	0.1729	0.000631405

4. tabula. Kameras teču līmeņa noteikšana

Row	$U[V]$	$I_{Q=150}[mA]$	$I_{Q=175}[mA]$
1	500	10	50
2	550	15	90
3	600	28	115
4	650	90	150
5	700	125	170
6	750	140	183
7	800	160	190
8	850	172	200
9	900	180	205
10	950	190	210
11	1000	195	220

6. tabula. Mirdzizlādes pētīšana



3. att. Mirdzizlādes voltampērliknes pie dažādiem Ar plūsmas ātrumiem

## 5.1. Rezultāti

Noteikts kameras robežspiediens  $p_r = 1.7 \cdot 10^{-5} \text{Tor} = 2.3 \text{mPa}$  un teču lielums  $Q_t = 584 \pm 30 \text{Pa} \cdot \text{cm}^3/\text{s} = 0.352 \pm 0.018 \text{sscm}$ . Pie robežspiediena tādēļ efektīvais sūkņēšanas ātrums  $S_{eff} = Q_t/p_r = 0.254 \text{m}^3/\text{s}$ .

Putinot paraugu  $2 \text{min}$  pie sprieguma  $U = 700 \text{V}$  un  $I = 125 \text{mA}$  ieguvām tā biezumu  $400 \text{nm}$ . Tas nozīmē, ka lai iegūtu vienu Cu atomu uz metāla tika patērēti  $2.77e$  jeb  $1.943 \text{keV}$

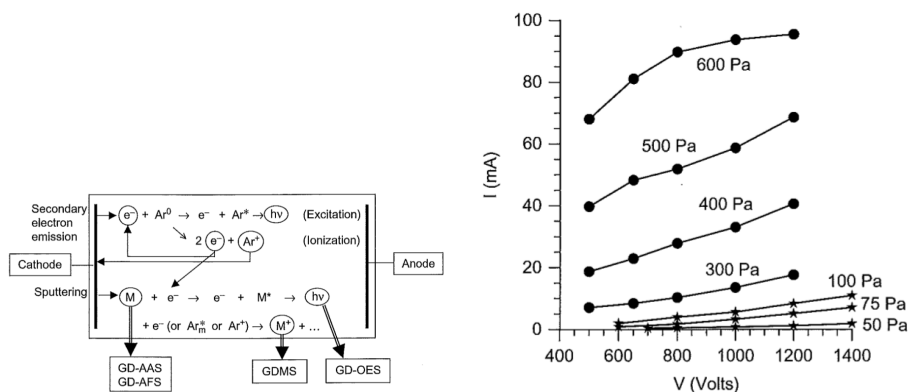
## 6. Secinājumi

Kameras efektīvā atsūkņēšanas ātruma noteikšanai pie dažādiem spiedieniem izmantojām argona gāzi, kura ar nomērāmu plūsmu ielūda kamerā. Plūsmu izvēlējamies vairākas kārtas lielāku nekā kameras teces, tādēļ to varēja neņemt vērā. Sūkņa efektīvā atsūkņēšanas ātruma atkarība redzama attēlā fig. 2.

Visā mērīšanas diapazonā sūkņēšanas efektivitāte ir mazāka par dokumentācijā doto  $1.5 \text{m}^3/\text{s}$  turbomolekulārajam sūknim, kur starpība radusies galvenokārt dēļ mazās cauruļu vadāmības. Pie lieliem spiedieniem efektivitāte samazinās, jo starp turbomolekulārā sūkņa lāpstiņām gāzes molekulas paspēj sadursmju rezultātā izlīdzināt izotropiski ar lāpstiņu triecienu iedoto impulsu. To apstiprina brīvā ceļa garuma tuvošanās ierīces izmēriem ap  $10 \text{cm}$  pie  $p = 1 \cdot 10^{-4} \text{Tor}$ . Pie maziem spiedieniem jeb  $P < 0.3 \text{Pa}$  efektivitāte samazinās dēļ atpakaļ ejošās plūsmas jeb varbūtība, ka molekula no izejas atgriezīsies ieejā kļūst salīdzināma ar varbūtību molekulai no ieejas nonākt izejā.

Lai novērtētu optimālus parametrus virsmas putināšanai, uzņēmām voltampēr raskurtlīknes pie divām dažādām argona plūsmām (jeb spiedieniem, jo sūknis bija ieslēgts), kuras redzamas attēlā fig. 3. Plazmas aizdedzināšanai ir nepieciešama minimālā potenciāla starpība, ko redzam pie  $600 \text{V}$  un  $150 \text{sscm}$ , bet pie  $175 \text{sscm}$  aizdedzināšanas vērtība ir pirms  $500 \text{V}$ . Šim efektam modeli ir izveidojis [1], kurš parāda, ka eksistē tāds spiediens pie kura jonizācijai nepieciešamais spriegums ir minimāls. Pie lielāka sprieguma savukārt elektrona slazdojošais efekts pie mērķa magnētiskā lauka kļūst salīdzinoši mazāks tādēļ pieaug strāva.

Lai izprastu līkņu atkarības formu izmantoju [3] atrodamo modeli ar nomodelētām raskurtlīknēm Ar pie dažādiem kameras spiedieniem.



Vizuāli redzam labu sakritību pie Ar gāzes spiediena  $600 \text{Pa}$ , bet pie mazākiem spiedieniem šī atkarība kļūst citādāka. Pie Ar plūsmas  $150 \text{sscm}$  spiediens kamerā ir tikai  $0.5 \text{Pa}$ , bet jau novērojams piesātināšanās efekts. Tā kā temperatūra sadalījums gāzē lielā mērā atkarīgs no siltumapmaiņas procesiem, kuri jāiestata modelī ar roku, tad šīs līknes varam izmantot kvalitatīvi, lai skaidrotu plazmā notiekošos procesus.

Pateicoties elektronu gāzēs koncentrācijai  $N_e$  un mijiedarbībai ar argona gāzi pēc reakcijas  $Ar^0 + e^- \rightarrow Ar^+ + 2e^-$  ir spēkā elektronu ģenerēšana pēc formulas [1, eq (20.44)]

$$\frac{dN_e}{dt} = \alpha N_e \quad \alpha = N_{Ar} \langle v \sigma_{ion} \rangle / w_e \quad (9)$$

kur  $w_e$  ir elektronu vidējais pārvietošanās ātrums. Parasti elektronu kinētiskā enerģija ievērojami pārsniedz argona atoma jonizācijas enerģiju un tad var pieņemt, ka jonizācijas šķērssgriezumam ir eksponenciāls rasktors  $\sigma \propto \exp(-(E_{el} - E_{ion})/k_B T)$  tad pēc [1, eq (20.54)] iegūst, ka raksturlīknei ir jābūt  $I \propto U^2$ . Šādu ainu mēs redzam pie maziem spiedieniem modelētajām raksturlīknēm iepriekšējā grafikā.

Lai raksturotu piesātinājumu, ir jāņem vērā arī, ka elektrons saduroties ar argonu var arī to tikai atstāt ierosinātā stāvoklī jeb  $Ar^0 = e^- \rightarrow Ar^* + e^-$ . Ši procesa rezultātā elektrons daļu savas kinētiskās enerģijas ir zaudējis, bet ierosinātais argons sabrūk atdodot fotonu  $Ar^* \rightarrow \gamma + Ar^0$ . Tas nozīmē, ka elektronu vidējais ātrums tiek ierobežots un tādēļ to spēja ģenerēt jaunus elektronus pēc argona sadursmēm. Šis putināšanai ir nevēlams efekts, jo netiek uzģenerēti  $Ar^+$  joni, kuri tvaicē katoda metālu.

Putināšanai izvēloties  $U = 700V$  un  $150sscm$ , kam ir mazāki zudumi,  $2min$  ieguvām kārtiņu ar biezumu  $400nm$ . No strāvu šajā procesā var noteikt nepieciešamo darbu, kas patērēts vara atomu pārnēsot no mērķa, kas vienāds ar  $1.94keV$ . Salīdzinot šo vērtību ar virsmas enerģiju vara atomam  $3.48eV$  [2] un Ar jonizācijas enerģiju  $15eV$  varam secināt, ka liela daļa enerģijas ir izmanto neefektīvi.

## Literatūras saraksts

- [1] Von Engel, A., & Singer, S. F. (1956). Ionized Gases. Physics Today, 9(6), 26. doi:10.1063/1.3059995
- [2] Kudriavtsev, Y., Villegas, A., Godines, A., & Asomoza, R. (2005). Calculation of the surface binding energy for ion sputtered particles. Applied Surface Science, 239(3-4), 273–278. doi:10.1016/j.apsusc.2004.06.014
- [3] Vogl, J. (2011). Diane Beauchemin and Dwight E. Matthews (Eds.): The encyclopedia of mass spectrometry, Volume 5: Elemental and isotope ratio mass spectrometry. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 401(2), 573–574. doi:10.1007/s00216-011-5106-0