

VAKUUMSKI MERILNIK NA VRTEČO SE KROGLICO

Mag. Gorazd Planinšič, Fakulteta za naravoslovje in tehnologijo, Odsek za fiziko, Jadranska 19, 61111 Ljubljana

Spinning rotor gauge

Povzetek

Vakuumski merilnik na vrtečo se kroglico se je v zadnjem desetletju uveljavil v vakuumski metrologiji kot absolutni merilnik, ki je v področju 10^{-5} -1 Pa bolj natančen in stabilen kot ostali visokovakuumski merilniki. Največ se uporablja v laboratorijih za standarde pri kalibraciji drugih merilnikov in kot prenosni standardni merilnik. Uveljavil se je tudi pri razvoju in izdelavi tehnološko zelo zahtevnih izdelkov, kjer je potrebno natančno meriti tlak.

Abstract

Spinning rotor gauge (SRG) is a modern viscosity vacuum measuring device, more accurate and more stable than other high vacuum gauges in the range 10^{-5} to 1 Pa. SRG is an absolute vacuum gauge. In the past ten years SRG was widely used as transfer standard and for HV gauges calibration. It can be also used for accurate measurements in sealed-off devices.

1. Uvod

Pri merjenju nizkih tlakov pogosto naletimo na tehnološke in tudi na teoretične težave. Območje nizkih tlakov razdelimo na več razredov (tabela 1)/1/. Običajno govorimo o vakuumu šele takrat, ko je povprečna prosta pot molekule plina večja od dimenzij posode.

Tabela 1. Razdelitev vakuuma glede na tlak in odgovarjajočo številsko gostoto molekul plina

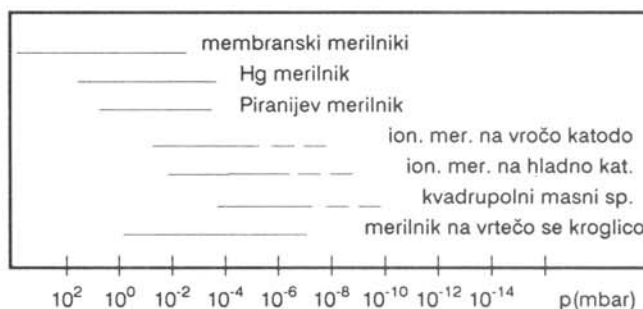
	grobi vakuum	srednji vakuum	visoki vakuum	ultravisoki vakuum (UVV)
p(mbar)	1000 - 1	1 - 10^{-3}	10^{-3} - 10^{-7}	$< 10^{-7}$
n (št. mol na cm^3)	10^{19} - 10^{16}	10^{16} - 10^{13}	10^{13} - 10^8	$< 10^8$
	Mt. Everest ~300 mbar	rotacijska črpalka	termovka elektronka	prot. pospeš. medzvezdni prost.

Vakuumski merilniki izkoriščajo razne fizikalne pojave, ki so na različne načine povezani s tlakom, oziroma s številsko gostoto plinskih molekul. V tabeli 2 so značilni predstavniki vakuumskih merilnikov in njihova merilna območja.

Zaželeno je, da sam proces merjenja čim manj zmoti eksperiment. Zahteva je še posebej pomembna pri modernih tehnologijah naprejevanja tankih plasti. Starejši merilniki vakuuma imajo pogosto slabost, da bodisi spuščajo v sistem ione, atome ali elektrone, bodisi vežejo nase preostale molekule v sistemu in s tem zmanjšajo natančnost merjenja. Poleg tega so zaradi svoje velikosti neprimerni za opazovanje

dogajanj v zelo majhnih vakuumskih sistemih, saj s svojo prisotnostjo spremenijo razmere v opazovanem sistemu. Meritev je tedaj nezanesljiva, še posebej če zasledujemo časovne spremembe.

Tabela 2. Območja vakuumskih merilnikov



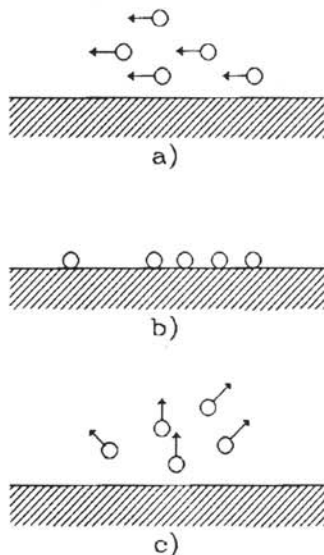
2. Vakuumski merilnik na vrtečo se kroglico

2.1. Teorija

Mnogim težavam z dosedanjimi vakuumskimi merilniki se izognemo z uporabo merilnika na vrtečo se kroglico. Princip delovanja je preprost. Opazujemo zaviranje prosto vrteče se jeklene kroglice v razredčenem plinu. Z merjenjem negativnega kotnega pospeška lahko določimo tlak plina./2-9/

Izpeljali bomo zvezo med pospeškom kroglice in tlakom v posodi za primer, ko je povprečna prosta pot molekul dosti večja od dimenzij posode. Predpostavili bomo, da doživljajo molekule plina s površino kroglice neelastične trke, da je hitrostna porazdelitev molekul, ki so izstopile s površine izotropna in da je sistem predhodno dobro termostatiran. Na koncu bomo pravilnost predpostavk podkrepili z eksperimentalnimi podatki.

Povprečna vektorska hitrost molekul - gledano v laboratorijskem sistemu - je enaka nič. Opazujemo dogajanje s stališča delčka krogelne površine, ki se giblje s tangencialno hitrostjo $u = r \omega$, kjer je r razdalja od površine do osi vrtenja, ω pa kotna hitrost krogle (slika 1). S stališča površine je povprečna vektorska hitrost molekul enaka $-u$. Na površini se molekule ustavijo in pri tem predajo svojo gibalno količino površini. Po nekem času zapustijo površino z določeno hitrostjo. Predpostavili smo izotropno porazdelitev molekul, ki so izstopile. Zato v povprečju ne prispevajo ničesar k ustavljanju kroglice.



Slika 1. Neprožen trk molekul z gibajočo površino, gledano s stališča površine; a) molekule pred trkom, b) molekule se prilepijo na površino, c) molekule odletijo s površine

Preselimo se v laboratorijski sistem. K spremembi vrtilne količine kroglice prispevajo torej samo nanjo padajoče molekule. Pri trku z molekulo mase m_i se krogli zmanjša vrtilna količina v povprečju za

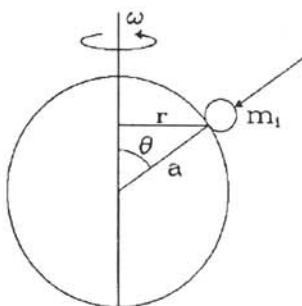
$$-d\Gamma_i = m_i r^2 \omega = m_i \omega a^2 \sin^2 \theta$$

Pomen količin r , a in ω je razviden iz slike 2. Število trkov molekul v časovni enoti z enoto površine je podano z izrazom $1/10$

$$\nu = 1/4 \bar{v} n$$

kjer je \bar{v} povprečna hitrost molekul

$$\bar{v} = \frac{8kT}{\pi m_i} \tag{1}$$



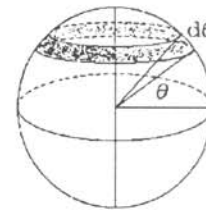
Slika 2. Molekula mase m trči s površino kroglice z radijem a

T je temperatura plina in n številna gostota molekul plina. V času dt torej na krogelni pas, ki je določen s kotom $d\theta$, prileti

$$N = S \nu dt = 2\pi a^2 \sin\theta d\theta \nu dt$$

molekul plina (slika 3). Krogli se zmanjša vrtilna količina za:

$$d\Gamma = N d\Gamma_i = \left[\int 2\pi a^4 m \omega \nu \sin^3 \theta d\theta \right] dt$$



Slika 3. Krogelni pas, ki pripada kotu $d\theta$

Dobili smo časovni odvod vrtilne količine

$$\left(\frac{d\Gamma}{dt}\right)_c = -\frac{8\pi}{3} \nu a^4 \omega m \tag{2}$$

Upoštevali bomo, da je

$$\left(\frac{d\Gamma}{dt}\right)_c = J \dot{\omega} \tag{3}$$

kjer je J vztrajnostni moment polne kroglice z radijem a , maso m_k in gostoto ρ_k poznamo:

$$J = \frac{2}{5} m_k a^2 = \frac{8}{15} \pi a^5 \rho_k \tag{4}$$

Če sedaj v (3) upoštevamo enačbe (2) ter (1) in (4), dobimo

$$-\frac{\dot{\omega}}{\omega} = \frac{10}{\pi} \frac{p}{\bar{v} a \rho_k} \tag{5}$$

Tlak je sorazmeren količini $-\frac{\dot{\omega}}{\omega}$. Sorazmernostni faktor vsebuje znani količini a in ρ_k ter povprečno hitrost molekule. Iz enačbe (1) je razvidno, da potrebujemo za določitev hitrosti temperaturo in molsko maso molekul plina. Temperaturo najbolj zanesljivo določimo s predhodnim termostatiranjem celotnega sistema.

Pri izpeljavi enačbe (5) smo se omejili na razmere v razredčenem plinu. Za višje tlake (nad 10^{-2} mbar) zveza z relativnim pospeškom ni več linearna. Molekule plina doživljajo trke z izstopajočimi molekulami, kar pomeni, da porazdelitev vpadajočih molekul po smereh ni več izotropna. Opazimo izrazito nelinearnost.

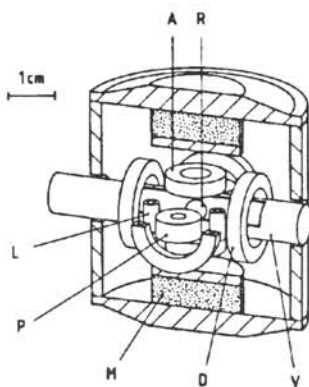
Za natančno določitev molske mase plina v sistemu navadno uporabimo kvadrupolni masni spektrometer. Groba ocena o sestavi preostalega plina pa je podana že z izbiro vakuumske črpalke, s katero smo sistem izčrpavali.

2.2 Izvedba merilnika

Na vakuumski sistem priključimo nekaj centimetrov dolg valj s prostornino okrog 3 cm^3 , v katerem je jeklena kroglica s premerom 4.5 mm. Na valj natakemo merilno glavo, v kateri je sistem tuljvic, ki omogoča magnetno lebdenje in pospeševanje kroglice, ter merjenje kotne hitrosti.

2.2.1 Magnetno lebdenje

Jekleno kroglico postavimo med dva permanentna magneta M (slika 4) tako, da gravitacijska sila uravnovesi magnetno. Žal je ravnovesje labilno, stabiliziramo ga lahko z dvema dodatnima tuljavama A, ki delujeta kot servomehanizem.



Slika 4. Prerez merilne glave SRG: R - rotor (kroglica), V - cevka, M - permanentni magnet, A - tuljava za navpično stabilizacijo lege kroglice, D - tuljava za pospeševanje, L - tuljava za lateralno dušenje, P - tuljava za čitanje.

Tuljavi napajamo s tokom. Če je kroglica prenizko, spustimo več toka skozi zgornjo tuljavo in obratno: več skozi spodnjo tuljavo, če kroglica zaide previsoko. Tok skozi tuljavi krmilimo s primerjalnim vezjem, ki zazna razliko njihovih impedanc. Z lego kroglice je namreč določena impedanca ene in druge tuljave. V vezje vključimo še primerno dušenje, da kroglica ne bi vertikalno zanihala.

Poleg vertikalne stabilizacije moramo poskrbeti tudi za horizontalno. Zato namestimo okrog kroglice še štiri tuljave L. Po dve in dve napajata tokova, ki ju krmilimo s podobnima vezjema kot pri tuljavah A.

Sistem za magnetno lebdenje vakuumskega merilnika ima konstanto dušenja okrog 1s.

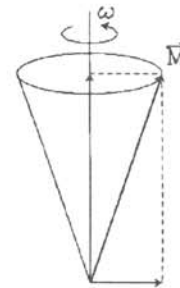
2.2.2. Pospeševanje kroglice

Štiri simetrično nameščene tuljave D so priključene na dvofazni generator izmenične napetosti. Med tuljavami nastane vrteče se magnetno polje, ki pospeši kroglico do frekvence priključene napetosti, to je 400 Hz. Ko tok skozi tuljavo D izključimo, se začne kroglica počasi ustavljati vse do frekvence vrtenja 350 Hz, ko jo zopet pospešimo do začetne hitrosti.

2.2.3. Merjenje pospeška

Jeklena kroglica ima v polju permanentnih magnetov poleg glavne - vertikalne komponente magnetizacije še majhno horizontalno komponento. Ta je posledica vrtečega se magnetnega polja, ki tudi po izključitvi pusti nekaj domen obrnjenih v smeri polja. Celotna magnetizacija torej ne kaže v smeri osi vrtenja, temveč kroži po plašču stožca s frekvenco vrtenja kroglice ω (slika 5).

Kotno hitrost kroglice merimo z dvema tuljavicama P. Kroženje magnetizacije po plašču stožca inducira v tuljavicah sinusno napetost. Signala sta časovno premaknjena za pol nihaja. Če ju odštejemo, dobimo signal z dvojno amplitudo, ki ga lahko še poljubno ojačimo. Frekvenco primerjamo s stabilno frekvenco kremenovega oscilatorja, ali pa štejemo vrhove signala v časovnem intervalu, ki ga odmeri digitalna ura.



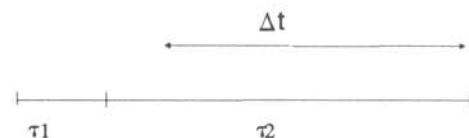
Slika 5. Celotna magnetizacija kroži po plašču stožca s frekvenco ω .

2.2.4. Določanje relativnega pospeška

Relativni pospešek lahko določimo le v končnem času. Potrebujemo primerno (digitalno) napravo, ki vodi merjenje, hrani izmerjene količine in jih sproti obdeluje. Količino $\dot{\omega}/\omega$ lahko izrazimo v obliki diferencialnih izrazov, ki obenem opisujejo potek meritve.

Označimo s τ čas v katerem naredi rotor N vrtljajev. Iz dveh zaporednih meritev τ_1 in τ_2 lahko določimo relativni pospešek (slika 6).

$$\dot{\omega} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\Delta t} = \frac{\frac{N}{\tau_2} - \frac{N}{\tau_1}}{\tau_2} = - \frac{N(\tau_2 - \tau_1)}{\tau_1 \tau_2^2}$$



Slika 6. Merjenje relativnega pospeška

Če za ω vzamemo $\omega_2 = N/\tau_2$, dobimo:

$$- \frac{\dot{\omega}}{\omega} = \frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_1 \tau_2}$$

2.3. Natančnost merjenja

Upočasnjevanje kroglice smo pripisali le trkom z molekulami plina. Poleg tega sodeluje pri zaviranju še vrsta drugih pojavov, ki jih nismo upoštevali. Ta poenostavitev predstavlja največji del napake merjenja.

Kroglica se vede kot girooskop, ki vseskozi kaže v isto smer. Zaradi rotacije Zemlje okoli svoje osi pa os vrtenja ne sovpa več s smerjo silnic permanentnega magneteta. Rotor, to je kroglica, začne precesirati, kar povzroči vrtilne tokove in s tem magnetno zaviranje. Efekt je enako velik, kot če jo zavirajo molekule plina pri tlaku 10^{-7} mbar. Ta tlak predstavlja tudi spodnjo mejo merilnega območja. Vsi nadaljnji efekti so enakega ali pa manjšega velikostnega reda.

Prisotnost dodatnih šibkih magnetnih polj s komponento pravokotno na polje permanentnega magneteta lahko prav tako povzroči vrtilne tokove; s primernim kovinskim ohišjem merilne glave lahko vpliv zmanjšamo pod natančnost merjenja.

Zaradi gibajočega se naboja na steni steklenega valja (slika 4, valj V) ali na površini kroglice se pojavi dodatno magnetno polje, ki zavira gibanje kroglice. Pojavu se izognemo tako, da naporimo na stene valja tanko plast zlata ali pa uporabimo kovinske valje.

Med pospeševanjem vrteče se magnetno polje prehiteva rotor. Vrtilni tokovi segrejejo kroglico, zato se ji radij poveča. Med upočasnjevanjem se kroglica ohladi, radij se zmanjša, zato pa se poveča kotna hitrost kot posledica ohranitve vrtilne količine. Zato je potrebno pred prvim merjenjem sistem dobro termo-statirati, da se temperature izenačijo na 0.01°C natančno. Napaka je tedaj manjša od 10^{-7} mbar.

Del napake prinese tudi model sam, saj tako kot vsak model ne opisuje resničnega dogajanja v celoti. Najbolj drzna predpostavka je bila, da molekule, ki so izstopile s površine ne podelijo krogli v povprečju nobene gibalne količine. Koeficient je odvisen od vrste plina in od površine. Povezan je z akomodacijskim koeficientom tangeencialne gibalne količine s:

$$\sigma = \frac{\varphi_v - \varphi_0}{\varphi_v - \varphi_s}$$

kjer pomeni φ_v tok gibalne količine vpadnih molekul, φ_0 tok gibalne količine odbitih molekul in φ_s tok gibalne količine molekul, ki imajo Maxwellovo porazdelitev hitrosti, po tem ko so dosegle temperaturno ravnovesje s temperaturo stene. Povsod je mišljena tangeencialna komponenta gibalne količine. Za različno obdelane krogelne površine je koeficient σ_{ef} različen. Pri dani površini pa se za posamezne pline zelo malo razlikuje; razlike so pod 5% (tabela 3). Poleg tega pa je iz iste tabele razvidno, da se σ_{ef} malo razlikuje od enice ne glede na kombinacijo plin - površina. Naš model torej dobro opisuje stanje dejanskega dogajanja.

Dolgoletne meritve so pokazale tudi odlično časovno stabilnost koeficienta σ_{ef} . Relativna sprememba koeficienta po treh letih je bila manjša od 1%. Zato sta se zahodnonemški državni fizikalni inštitut v Berlinu in narodni biro za postavljanje standardov v Washingtonu odločila, da sprejmeta vakuumski merilnik na vrtečo se kroglico kot prenosni standard za kalibracijo merilnikov vakuumu v območju od 10^{-4} do 10^{-6} mbar.

Tabela 3. Vrednosti koeficienta σ_{ef} za različne kombinacije površina - plin za jekleno kroglico.

plin	H ₂	He	CH ₄	Ne	N ₂	Ar	Kr	Xe
površina								
jedkano jeklo	1.024	1.016	1.010	0.998	1.008	1.008	1.012	1.012
peskano jeklo	1.191	1.212	1.177	1.209	1.186	1.179	1.167	1.156
polirano jeklo		1.209		1.179		1.114		1.127

3. Literatura

- /1/ Zbornik predavanj "Osnove vakuumske tehnike", Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije, Ljubljana, 1984
- /2/ J. K. Fremery, J. Vac. Sci. Technol. A3, 1715 (1985)
- /3/ J. K. Fremery, Vacuum 32, 685 (1982)
- /3/ G. Comsa, J. K. Fremery, J. Vac. Sci. Technol. 17, 642 (1980)
- /5/ G. Comsa, J. K. Fremery, Proc. 8 Int. Vacuum Congress, Cannes, Vol. II, 218 (1980)
- /6/ Messer, L. Rubet, Proc. 8 Int. Vacuum Congress, Cannes, Vol. II, 259 (1980)
- /7/ J. W. Beams, J. L. Young, J. Appl. Phys. 17, 886 (1946)
- /8/ J. W. Beams, D. M. Spitzer, Rev. Sci. Instr. 33, 151 (1962)
- /9/ J. P. Hobson, Proc. 9 Int. Vacuum Congress, Madrid, 35 (1983)
- /10/ B. Loeb, The kinetic theory of gases, Mc Graw-Hill, New York 1934

OBVESTILO

Naročnike Vakuumista, ki še niste poravnali naročnine za leto 1991, vljudno prosimo, da to storite čimprej. Naročnino 150,00 SLT nakažite na žiro račun Društva za vakuumsko tehniko Slovenije, Teslova 30, Ljubljana: 50101-678-52240.