Měřící metody a díly vakuových aparatur

Richard Švejkar

Katedra laserové fyziky a fotoniky
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
České vysoké učení technické v Praze

richard.svejkar@fjfi.cvut.cz
www.richardsvejkar.cz

27. října 2025

Opakování

- Vakuová aparatura má vždy zdroje plynu

Opakování

- Vakuová aparatura má vždy zdroje plynu
- Čerpací rychlost vývěvy S je základní parametr definovaný výrobcem

Opakování

- Vakuová aparatura má vždy zdroje plynu
- Čerpací rychlost vývěvy S je základní parametr definovaný výrobcem
- Transportní vývěvy:
  - Transport molekul mimo aparaturu
  - Turbomolekulární, membránová, scrool, rotační a difusní olejová
  - Většinou pro pomocné vakuum (předčerpání)

Opakování

- Vakuová aparatura má vždy zdroje plynu
- Čerpací rychlost vývěvy S je základní parametr definovaný výrobcem
- Transportní vývěvy:
  - Transport molekul mimo aparaturu
  - Turbomolekulární, membránová, scrool, rotační a difusní olejová
  - Většinou pro pomocné vakuum (předčerpání)
- Sorpční vývěvy:
  - Vazba plynu na připravené plochy (uvnitř aparatury)
  - Vazba nízkou teplotou - kryogenní a kryosorpční
  - Vazba titanem - sublimační a iontové
  - Getter
  - Spouštění při nízkých tlacích pro dosažení finálního vakua

Opakování

- Vakuová aparatura má vždy zdroje plynu
- Čerpací rychlost vývěvy S je základní parametr definovaný výrobcem
- Transportní vývěvy:
  - Transport molekul mimo aparaturu
  - Turbomolekulární, membránová, scrool, rotační a difusní olejová
  - Většinou pro pomocné vakuum (předčerpání)
- Sorpční vývěvy:
  - Vazba plynu na připravené plochy (uvnitř aparatury)
  - Vazba nízkou teplotou - kryogenní a kryosorpční
  - Vazba titanem - sublimační a iontové
  - Getter
  - Spouštění při nízkých tlacích pro dosažení finálního vakua
- Volba vývěv záleží na konkrétním experimentu
- Čistota vakua, mezní tlak, rychlost dosažení mezního tlaku

Přehled

Vakuometry

Měření parciálních tlaků

Měření proudu plynu

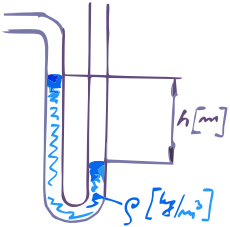
Hledání netěsností

Díly vakuových aparatur

Kapalinové vakuometry

U-manometry

Otevřený kapalinový U-manometr – měření rozdílu tlaku podle rozdílu výšky sloupců kapaliny



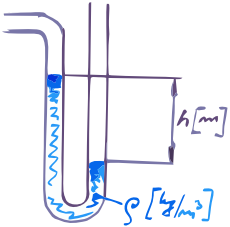
Kapalinové vakuometry

U-manometry

OTEVŘENÝ KAPALINOVÝ U-MANOMETR – měření rozdílu tlaku podle rozdílu výšky sloupců kapaliny

Pro rtuť:

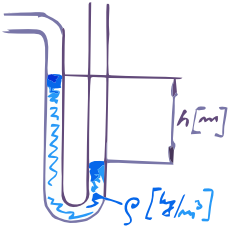
- h = 1 mm je $\Delta p = 133$ Pa = 1 Torr
- 1 - 760 mm $\rightarrow \Delta p \approx 100$ - 10^5 Pa
- Přesnost odečítání okem $\pm$ 133 Pa



Kapalinové vakuometry

U-manometry

OTEVŘENÝ KAPALINOVÝ U-MANOMETR – měření rozdílu tlaku podle rozdílu výšky sloupců kapaliny



Pro rtuť:

- h = 1 mm je Δp = 133 Pa = 1 Torr
- 1 - 760 mm $\rightarrow$ Δp $\approx$ 100 - 10^5 Pa
- Přesnost odečítání okem $\pm$ 133 Pa

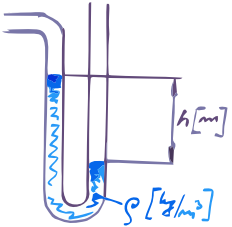
Pro olej:

- $\rho = 10^3$ kg/m^3 $\Leftrightarrow$ h = 1 mm je Δp = 10 Pa
- Rozsah Δp $\geq$ 10 Pa

Kapalinové vakuometry

U-manometry

OTEVŘENÝ KAPALINOVÝ U-MANOMETR – měření rozdílu tlaku podle rozdílu výšky sloupců kapaliny



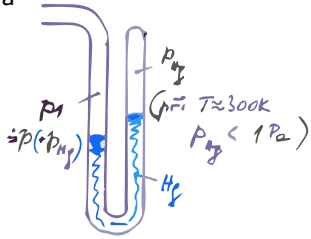
Pro rtuť:

- h = 1 mm je $\Delta p = 133$ Pa = 1 Torr
- 1 - 760 mm $\rightarrow \Delta p \approx 100$ - 10^5 Pa
- Přesnost odečítání okem $\pm$ 133 Pa

Pro olej:

- $\rho = 10^3$ kg/m^3 $\Leftrightarrow$ h = 1 mm je $\Delta p = 10$ Pa
- Rozsah $\Delta p \geq 10$ Pa

UZAVŘENÝ KAPALINOVÝ U-MANOMETR



- Absolutní měření tlaku $p_{Hg} < 1$ Pa
- Pro spojité měření tlaku
- Zúžení v dolní části

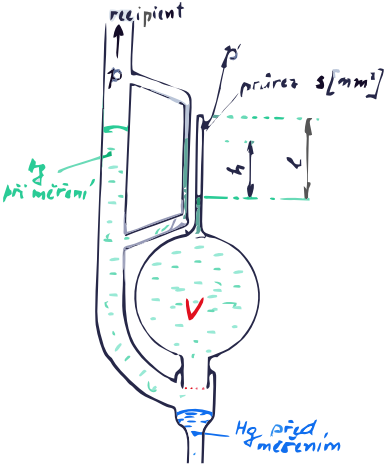
Kapalinové vakuometry

McLeodův manometr

- Absolutní měřidlo
- Měří celkový tlak plynů a par, kromě par rtuti
- Pomocná kapilára – vyloučení vlivu deprese rtuti
- Nelze provádět spojitá měření
- Měřící rozsah závisí na velikosti manometru
- Možné využití jako kalibrační měřidlo

$$p = 133,3 \cdot \frac{s\,h\,l}{V} \quad [Pa, mm]$$

Praktické uspořádání h = l,



Tepelné vakuometry

Využívají závislost (změnu) tepelné vodivosti plynu při klesajícím tlaku

Tepelné vakuometry

Využívají závislost (změnu) tepelné vodivosti plynu při klesajícím tlaku

Každý tepelný manometr je tvořen:

- Topným elementem – tenké vlákno zahřívané průchodem proudu

Tepelné vakuometry

Využívají závislost (změnu) tepelné vodivosti plynu při klesajícím tlaku

Každý tepelný manometr je tvořen:

- Topným elementem – tenké vlákno zahřívané průchodem proudu
- Umístěné ve vyčerpaném objemu

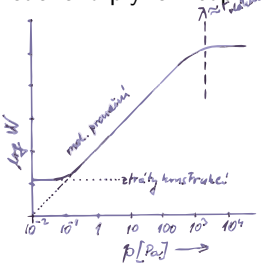
Tepelné vakuometry

Využívají závislost (změnu) tepelné vodivosti plynu při klesajícím tlaku

Každý tepelný manometr je tvořen:

- Topným elementem – tenké vlákno zahřívané průchodem proudu
- Umístěné ve vyčerpaném objemu

Vlivem proměnné tepelné vodivosti plynu se při konstantním příkonu mění množství tepla odvedeného plynem topnému elementu a tím i jeho teplota



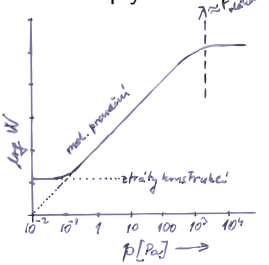
Tepelné vakuometry

Využívají závislost (změnu) tepelné vodivosti plynu při klesajícím tlaku

Každý tepelný manometr je tvořen:

- Topným elementem – tenké vlákno zahřívané průchodem proudu
- Umístěné ve vyčerpaném objemu

Vlivem proměnné tepelné vodivosti plynu se při konstantním příkonu mění množství tepla odvedeného plynem topnému elementu a tím i jeho teplota



Tepelné manometry měří celkový tlak plynů a par. Jejich údaj závisí na druhu plynu. Tlak nelze vypočítat na základě znalosti rozměrů manometru ⇒ měření není absolutní. Spojité měření v rozsahu 10^5 - 10^{-2} Pa.

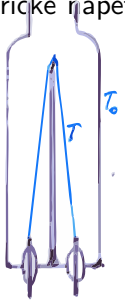
Tepelné vakuometry

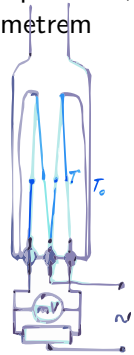
Odporový (Piraniho) – změna odporu ohřívaného odporového vlákna (Ni, Mo, W, Pt) s teplotou R(T), změny teploty určujeme ze změn odporu vlákna

Tepelné vakuometry

Odporový (Piraniho) – změna odporu ohřívaného odporového vlákna (Ni, Mo, W, Pt) s teplotou R(T), změny teploty určujeme ze změn odporu vlákna

Termočlánkový – vlákno zahřívané elektrickým proudem, ale teplota je měřena termočlánkem, termoelektrické napětí se měří voltmetrem





Ionizační vakuometry

Při průchodu svazku elektronů neutrálním plynem dochází ke srážkám s molekulami a ionizaci plynu.

Ionizační vakuometry

Při průchodu svazku elektronů neutrálním plynem dochází ke srážkám s molekulami a ionizaci plynu.

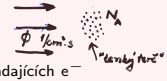
Počet iontů je úměrný počtu srážek a tedy koncentraci molekul a závisí na energii elektronů. S rostoucí energií počet vzniklých iontů nejprve roste a poté mírně klesá.

Ionizační vakuometry

Při průchodu svazku elektronů neutrálním plynem dochází ke srážkám s molekulami a ionizaci plynu.

Počet iontů je úměrný počtu srážek a tedy koncentraci molekul a závisí na energii elektronů. S rostoucí energií počet vzniklých iontů nejprve roste a poté mírně klesá.

$$\mathbf{N_i} = \sigma_\mathbf{i} \cdot \mathbf{N} \cdot \phi$$



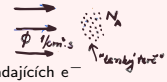
N_i – počet ionizací, σ_i – účinný průřez, N – počet molekul, ϕ – hustota toku dopadajících e^-

Ionizační vakuometry

Při průchodu svazku elektronů neutrálním plynem dochází ke srážkám s molekulami a ionizaci plynu.

Počet iontů je úměrný počtu srážek a tedy koncentraci molekul a závisí na energii elektronů. S rostoucí energií počet vzniklých iontů nejprve roste a poté mírně klesá.

$$\mathbf{N_i} = \sigma_\mathbf{i} \cdot \mathbf{N} \cdot \phi$$



N_i – počet ionizací, σ_i – účinný průřez, N – počet molekul, ϕ – hustota toku dopadajících e^-

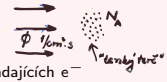
Při konstantní energii, je počet iontů vytvořených 1 e^- za 1 sek úměrný tlaku. Pokud vhodným způsobem změříme množství vzniklých iontů, určíme tlak:

Ionizační vakuometry

Při průchodu svazku elektronů neutrálním plynem dochází ke srážkám s molekulami a ionizaci plynu.

Počet iontů je úměrný počtu srážek a tedy koncentraci molekul a závisí na energii elektronů. S rostoucí energií počet vzniklých iontů nejprve roste a poté mírně klesá.

$$\mathbf{N_i} = \sigma_\mathbf{i} \cdot \mathbf{N} \cdot \phi$$



N_i – počet ionizací, σ_i – účinný průřez, N – počet molekul, ϕ – hustota toku dopadajících e^-

Při konstantní energii, je počet iontů vytvořených 1 e^- za 1 sek úměrný tlaku. Pokud vhodným způsobem změříme množství vzniklých iontů, určíme tlak:

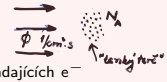
- Triodový manometr se žhavenou katodou (Bayard-Alpert)

Ionizační vakuometry

Při průchodu svazku elektronů neutrálním plynem dochází ke srážkám s molekulami a ionizaci plynu.

Počet iontů je úměrný počtu srážek a tedy koncentraci molekul a závisí na energii elektronů. S rostoucí energií počet vzniklých iontů nejprve roste a poté mírně klesá.

$$\mathbf{N_i} = \sigma_\mathbf{i} \cdot \mathbf{N} \cdot \phi$$



N_i – počet ionizací, σ_i – účinný průřez, N – počet molekul, ϕ – hustota toku dopadajících e^-

Při konstantní energii, je počet iontů vytvořených 1 e^- za 1 sek úměrný tlaku. Pokud vhodným způsobem změříme množství vzniklých iontů, určíme tlak:

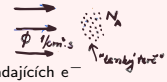
- Triodový manometr se žhavenou katodou (Bayard-Alpert)
- Výbojový Penningův manometr

Ionizační vakuometry

Při průchodu svazku elektronů neutrálním plynem dochází ke srážkám s molekulami a ionizaci plynu.

Počet iontů je úměrný počtu srážek a tedy koncentraci molekul a závisí na energii elektronů. S rostoucí energií počet vzniklých iontů nejprve roste a poté mírně klesá.

$$\mathbf{N_i} = \sigma_\mathbf{i} \cdot \mathbf{N} \cdot \phi$$



N_i – počet ionizací, σ_i – účinný průřez, N – počet molekul, ϕ – hustota toku dopadajících e^-

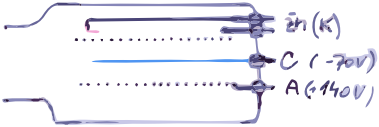
Při konstantní energii, je počet iontů vytvořených 1 e^- za 1 sek úměrný tlaku. Pokud vhodným způsobem změříme množství vzniklých iontů, určíme tlak:

- Triodový manometr se žhavenou katodou (Bayard-Alpert)
- Výbojový Penningův manometr
- Inverzní magnetronová měrka

Ionizační vakuometry

Se žhavenou katodou (Bayard-Alpert)

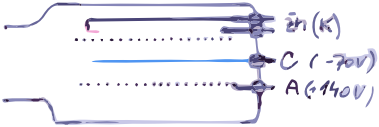
- Anoda – kladné napětí do 200 V
- Mřížka – záporné napětí do - 70 V



Ionizační vakuometry

Se žhavenou katodou (Bayard-Alpert)

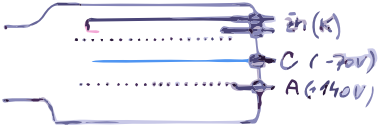
- Anoda – kladné napětí do 200 V
- Mřížka – záporné napětí do - 70 V
- Elektronový proud i^- katoda
  - anoda ionizuje plyn ve vakuometru



Ionizační vakuometry

Se žhavenou katodou (Bayard-Alpert)

- Anoda – kladné napětí do 200 V
- Mřížka – záporné napětí do - 70 V
- Elektronový proud i^- katoda
  - anoda ionizuje plyn ve vakuometru
- Ionty jsou přitahovány k mřížce, v obvodu mřížky proud i^+



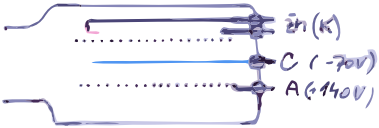
$$p = konst. \qquad p = k \cdot \frac{i^+}{i^-} \qquad c = \frac{1}{k}$$

k – konstanta závislá na geometrii manometru, druhu plynu a velikosti napětí, c – citlivost manometru

Ionizační vakuometry

Se žhavenou katodou (Bayard-Alpert)

- Anoda – kladné napětí do 200 V
- Mřížka – záporné napětí do - 70 V
- Elektronový proud i^- katoda
  - anoda ionizuje plyn ve vakuometru
- Ionty jsou přitahovány k mřížce, v obvodu mřížky proud i^+



$$p = konst. \qquad p = k \cdot \frac{i^+}{i^-} \qquad c = \frac{1}{k}$$

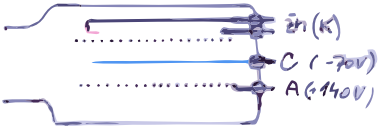
k – konstanta závislá na geometrii manometru, druhu plynu a velikosti napětí, c – citlivost manometru

Pokud se i^- udržuje konstantní pak i^+ je přímo úměrné tlaku

Ionizační vakuometry

Se žhavenou katodou (Bayard-Alpert)

- Anoda – kladné napětí do 200 V
- Mřížka – záporné napětí do - 70 V
- Elektronový proud i^- katoda
  - anoda ionizuje plyn ve vakuometru
- Ionty jsou přitahovány k mřížce, v obvodu mřížky proud i^+



$$p = konst. \qquad p = k \cdot \frac{i^+}{i^-} \qquad c = \frac{1}{k}$$

k – konstanta závislá na geometrii manometru, druhu plynu a velikosti napětí, c – citlivost manometru

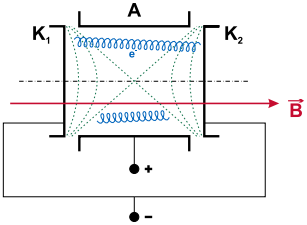
Pokud se i^- udržuje konstantní pak i^+ je přímo úměrné tlaku

V oblasti ultravakua (p $\leq 10^{-8}$ Pa) je i^+ silně ovlivněno parazitními jevy (foto-emise z kolektoru, desorbované ionty, vypařovaní katody, atd.)

Ionizační vakuometry

Se studenou katodou (Penningův manometr)

Výbojka s elektrodami v magnetickém poli

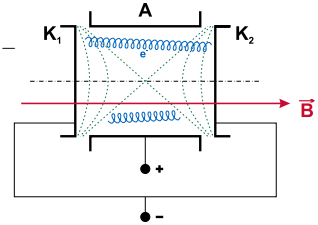


Ionizační vakuometry

Se studenou katodou (Penningův manometr)

Výbojka s elektrodami v magnetickém poli

Dráha e^- (přitahovány k anodě) se v magnetickému poli zakřiví, e^- oscilují mezi katodami $\Rightarrow$ větší pravděpodobnost srážky s neutrální částicí a následné ionizaci plynu



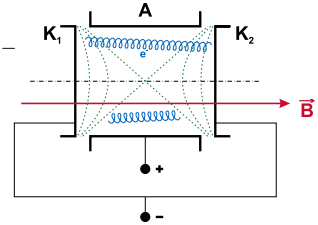
Ionizační vakuometry

Se studenou katodou (Penningův manometr)

Výbojka s elektrodami v magnetickém poli

Dráha e^- (přitahovány k anodě) se v magnetickému poli zakřiví, e^- oscilují mezi katodami $\Rightarrow$ větší pravděpodobnost srážky s neutrální částicí a následné ionizaci plynu

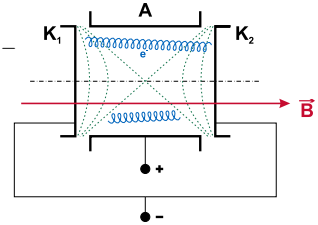
Ionty plynu poté letí přímo ke katodám a e^- opět oscilují v magnetickém poli.



Ionizační vakuometry

Se studenou katodou (Penningův manometr)

Výbojka s elektrodami v magnetickém poli



Dráha e^- (přitahovány k anodě) se v magnetickému poli zakřiví, e^- oscilují mezi katodami $\Rightarrow$ větší pravděpodobnost srážky s neutrální částicí a následné ionizaci plynu

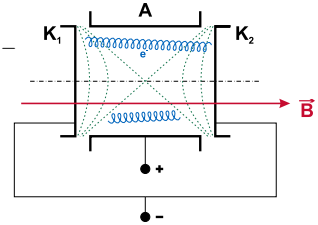
Ionty plynu poté letí přímo ke katodám a e^- opět oscilují v magnetickém poli.

Proud tekoucí výbojem je součtem proudu iontů a proudu sekundárních elektronů vyražených z katody po dopadu iontů.

Ionizační vakuometry

Se studenou katodou (Penningův manometr)

Výbojka s elektrodami v magnetickém poli



Dráha e^- (přitahovány k anodě) se v magnetickému poli zakřiví, e^- oscilují mezi katodami $\Rightarrow$ větší pravděpodobnost srážky s neutrální částicí a následné ionizaci plynu

Ionty plynu poté letí přímo ke katodám a e^- opět oscilují v magnetickém poli.

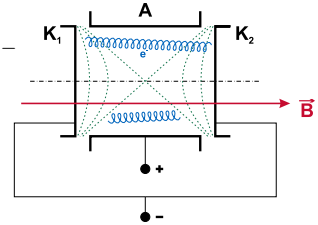
Proud tekoucí výbojem je součtem proudu iontů a proudu sekundárních elektronů vyražených z katody po dopadu iontů.

Oba proudy jsou úměrné koncentraci iontů a tedy i tlaku.

Ionizační vakuometry

Se studenou katodou (Penningův manometr)

Výbojka s elektrodami v magnetickém poli



Dráha e^- (přitahovány k anodě) se v magnetickému poli zakřiví, e^- oscilují mezi katodami $\Rightarrow$ větší pravděpodobnost srážky s neutrální částicí a následné ionizaci plynu

Ionty plynu poté letí přímo ke katodám a e^- opět oscilují v magnetickém poli.

Proud tekoucí výbojem je součtem proudu iontů a proudu sekundárních elektronů vyražených z katody po dopadu iontů.

Oba proudy jsou úměrné koncentraci iontů a tedy i tlaku. Do tlaku 10^{-4} Pa je možné využít jednoduché uspořádání měrky bez použití předzesilovače (nižší cena).

Od jednotek Pa až do 10^{-7} Pa, přesnost měření záleží na tlaku cca $\pm$ 30 %

Hlavní výhoda – nehrozí spálení katody !!!

Ionizační vakuometry

Inverzní magnetron

Souhrn vakuometrů

	Typ	Rozsah [Pa]	Přesnost [%]
Termočlánek	Tepelný	10^{-1} - 10^{5}	$\pm$ 15
Pirani	Tepelný	10^{-2} - 10^{5}	$\pm$ 15
Penning	Ionizační (SK)	10^{-7} - 10^{-1}	$\pm$ 30
Bayard-Alpert	Ionizační (ŽK)	10^{-8} - 10^{-1}	$\pm$ 15
Inv. magnetron	Ionizační (SK)	10^{-9} - 1	$\pm$ 30

Měření parciálních tlaků

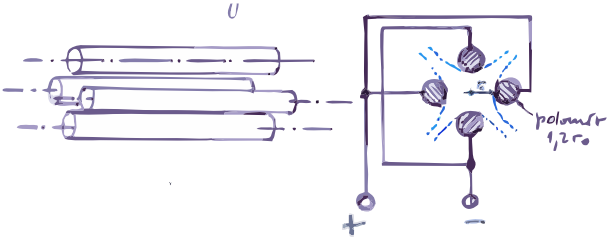
- Stanovení složení zbytkové atmosféry $\rightarrow$ jejích parciálních složek
- Analýza iontů podle prvků – analýza podle jejich hmotnosti
- Výsledkem měření je tedy hmotnostní spektrum

Měření parciálních tlaků

- Stanovení složení zbytkové atmosféry → jejích parciálních složek
- Analýza iontů podle prvků – analýza podle jejich hmotnosti
- Výsledkem měření je tedy hmotnostní spektrum

Kvadrupólový hmotnostní filtr

- Využívá vlastnosti pohybu nabitých částic při průchodu časově proměnným kvadrupólovým polem

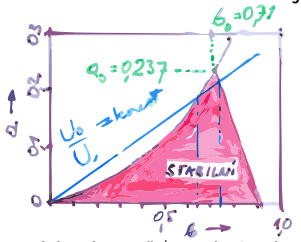


Měření parciálních tlaků

Kvadrupólový analyzátor

- Na dvojice elektrod se přivede napětí s konstantní a harmonicky proměnou složkou, $\phi = U_0 + U_1 \cdot cos(\Omega\, t)$
- V kvadrupólovém poli je možné charakterizovat částice o hmotnosti m a náboji q podle parametrů a, b:

  $a = \frac{4\, q\, U_0}{m\, r_0^2\, \Omega^2}$, $b = \frac{2\, q\, U_1}{m\, r_0^2\, \Omega^2}$



- V rovině (b,a) existuje oblast stability
- Body mimo tuto oblast → dráhy částic vzdalujících se od osy kp.
- Body na přímce v oblasti stability charakterizují interval hodnot $^{q}/_{m}$ částic, které se pohybují po nedivergujících drahách
- Neurčitost $\Delta(^{m}/_{q})$ je dána délkou úsečky U_0/U_1 v oblasti stability
- V praxi 4 tyče, ∅1 cm a délce 10 cm, obor tlaků $\geq 10^{-3}$ Pa

Měření proudu plynu

Byreta a mikrobyreta

Proud plynu q je množství plynu, které projde za jednotku času daným průřezem:

$$q = \frac{d(p \cdot V)}{d\,t}$$

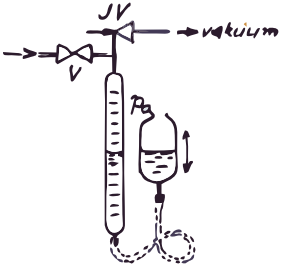
Měření proudu plynu

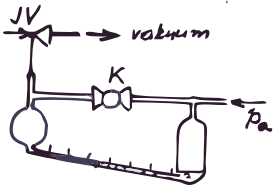
Byreta a mikrobyreta

Proud plynu q je množství plynu, které projde za jednotku času daným průřezem:

$$q = \frac{d(p \cdot V)}{d\,t}$$

Při měření proudu plynu napouštěného z atmosféry do vakuové aparatury se používá byreta nebo mikrobyreta, kde se měří objem plynu dV, který je za dobu dt kapalinou (olej, rtuť)





Hledání netěsností

Hrubé netěsnosti

- Bublinky (stačí mýdlová voda) – póry ve svárech, atd.
- Vtahování výboje – póry a dírky ve sklech

Hledání netěsností

Hrubé netěsnosti

- Bublinky (stačí mýdlová voda) – póry ve svárech, atd.
- Vtahování výboje – póry a dírky ve sklech

Jemné netěsnosti

- Změna barvy výboje v různých plynech
- Tepelné manometry – tepelná vodivost různých plynů
- Ionizační manometry – různá ionizace různých plynů
- Halogenový hledač netěsností – ovlivnění emise testovací látky
- Heliový hledač netěsností – hmotnostní analýza helia

Hledání netěsností

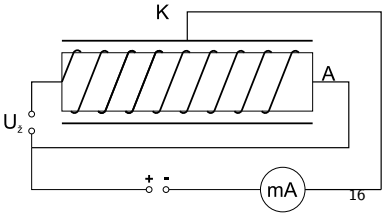
Hrubé netěsnosti

- Bublinky (stačí mýdlová voda) – póry ve svárech, atd.
- Vtahování výboje – póry a dírky ve sklech

Jemné netěsnosti

- Změna barvy výboje v různých plynech
- Tepelné manometry – tepelná vodivost různých plynů
- Ionizační manometry – různá ionizace různých plynů
- Halogenový hledač netěsností – ovlivnění emise testovací látky
- Heliový hledač netěsností – hmotnostní analýza helia

Halogenový hledač netěsností Emise iontů alkalických kovů vzroste v přítomnosti halových prvků (F, Cl) Keramická tyčinka s platinovým drátkem



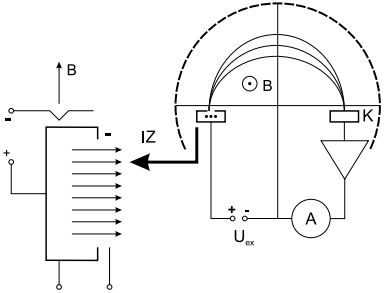
Heliový hledač netěsností

- Jedná se o samostatnou vakuovou aparaturu
- Ionizace zbytkového plynu v analyzační komoře
- Separace iontů helia a určení jejich množství
  - Statické magnetické pole nebo hmotnostní filtr
- Citlivost až 10^{-8} Pa·l/s

Heliový hledač netěsností

- Jedná se o samostatnou vakuovou aparaturu
- Ionizace zbytkového plynu v analyzační komoře
- Separace iontů helia a určení jejich množství
  - Statické magnetické pole nebo hmotnostní filtr
- Citlivost až 10^{-8} Pa·l/s

K – kolektor, IZ – iontový zdroj
A – ampérmetr, B – magnetická indukce



K analyzační komoře se vakuově připojí testovaná aparatura nebo součást, která se následně ofukuje úzkým praménkem helia. Pokud se helium dostane do aparatury, vzroste jeho koncentrace ve zbytkové atmosféře a tedy i proud heliových iontů na kolektor.

Díly vakuových aparatur

Materiály

Díly ze skla

- Původní vývoj vakuové techniky
- Dnes spíše malé laboratorní aparatury
- Zvony nebo okna do vakua

Díly vakuových aparatur

Materiály

Díly ze skla

- Původní vývoj vakuové techniky
- Dnes spíše malé laboratorní aparatury
- Zvony nebo okna do vakua

Díly z kovu

- Nerezová ocel, hliník
- Ohebné spoje – vlnovce (nerezová ocel)

Spoje

Rozebiratelné – příruby s těsněním

- Elastomery (vysoké vakuum) – guma, fluorokaučuk (VITON)
- Kov (UHV) – měď (OFHC), hliník, indium

Rozebiratelné – kuželové zábrusy těsněné vazelinou

Nerozebiratelné – sváry

Díly vakuových aparatur

Značení vakuových díků

Příruby a těsněním (elastomery)

- Těsnící kroužek je guma, VITON
- ISO-KF – Klein Flansche (malé příruby)
- ISO-QF – Quick Flange (rychlo-spojky)
- CF (ConFlat) – těsnění kov/kov

Příruby a těsněním (kov)

- Těsnění kov na kov
- CF (ConFlat)

Jmenovité průměry

- DN 10, 16, 25, 40, 50, ...
- DN 25 ISO-KF
- DN 16 – čistý průhled je 16 mm

Shrnutí

První část

Vakuometry

- Kapalinové manometry – hodnota tlaku dána rozdílem hladin
- Ostatní vakuometry – měření hustoty
- Piraniho měrka – ideální pro většinu aplikací a tlaky do řádu 10^{-2} Pa
- Pirani + Inv. magnetron (tzv. kombinovaná měrka) – při požadavcích na nižší tlaky do řádu 10^{-9} Pa, ideální volba (malé, kompaktní drahé)
- Měření blízko spodní meze rozsahu, typicky poslední řád
  - Nutno počítat s větší nepřesností měření!!!
- Běžně se diskutují pouze řády dosažených tlaků, nikoliv konkrétní hodnoty

Hledání netěsností

- Na skleněných dílech ideální vtahování výboje
- Kovové díly – mýdlová voda (větší netěsnosti), aceton + tepelný manometr
- Heliový hledač – přesný, vyžaduje lahev s heliem a je drahý

Shrnutí

Druhá část

Sestavování vakuové aparatury

- Účel aparatury a požadované tlaky
- Typ vývěvy a vakuometry
- Těsnění elastomery vs. kov
- Ideálně – pumpa co nejblíže k čerpanému objemu
- Co nejméně omezovat průměr potrubí, příklad
  - Hrdlo vývěvy DN 40
  - Neomezovat pod DN 25, silně ovlivní efektivní čerpací rychlost
  - Tedy i dobu potřebnou k vyčerpání
- Vypékání aparatury – odplynění povrchů
- UHV a EHV ???