

F4160

# Vakuová fyzika 1

Pavel Slavíček  
email: ps94@sci.muni.cz

# Osnova:

- Úvod a historický vývoj
- Volné plyny
  - statický stav plynů
  - dynamický stav plynů
- Získávání vakua - vývěvy s transportem molekul z čerpaného prostoru
  - vývěvy s periodicky se měnícím prostorem
  - vývěvy s neproměnným pracovním prostorem
  - paroproudové vývěvy
- Měření vakua
  - měření celkových tlaků
  - měření parciálních tlaků
  - hledání netěsností ve vakuových systémech

# Navazující přednášky:

- Vakuová fyzika 2 - F6450
  - Vázané plyny
  - Sorpční vývěvy
  - Měření ve vakuové fyzice
    - měření proudu plynu
    - měření tenze par
  - Konstrukční prvky vakuových zařízení
- Praktikum z vakuové fyziky - F7541
- Fyzika nízkých teplot - F8450

# Literatura

- J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981
- L. Pátý: Fyzika nízkých tlaků, Academia, Praha 1968
- V. Sítko: Vakuová technika, SNTL, Praha 1966
- J. Král: Cvičení z vakuové techniky, ČVUT Praha 1996
- V. Dubravcová: Vákuová a ultravákuová technika, Alfa, Bratislava 1992
- A. Roth: Vacuum technology, Elsevier, 1990
- J.F.O'Hanlon: A User's Guide to Vacuum Technology, Wiley, 2003
- W. Espe: Technologia hmot vákuovej techniky, Slovenská akadémia vied, Bratislava 1960
- A.Tálský, J.Janča: Speciální praktikum z vysokofrekvenční elektroniky a fyziky plazmatu, skripta, Brno 1975
- J.Jelínek, Z. Málek: Kryogenní technika, SNTL, Praha, 1982

- Delchar: Vacuum Physics and Techniques, Chapman Hall, 1993
- L.Patý: Základní pojmy fyziky plynů, SPNP, Praha 1970
- P.Lukáč: Zbierka príkladov z vakuovej fyziky, UKB, Bratislava 1988
- P.Lukač, V.Martišovitš: Netěsnosti vakuových systémov, Alfa, Bratislava 1981
- Zpravodaje CVS
- firemní katalogy
- internet: www - stránky výrobců vakuové techniky, ...

# Úvod

- Vakuum je označení pro stav systému, který obsahuje plyny, nebo páry, pokud je jejich tlak menší než tlak atmosférický.
- Jednotky tlaku:
  - $Pa[Nm^{-2}]$  - **jednotka v soustavě SI**
  - $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$
  - $1 \text{ mbar} = 100 \text{ Pa}$
  - $1 \text{ torr} = 133.322 \text{ Pa}$
  - $1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa} = 760 \text{ torr}$  (fyzikální atmosféra)
  - $1 \text{ at} = 98066.5 \text{ Pa} = 0.96784 \text{ atm}$  (technická atmosféra)
  - $1 \text{ psi} = 6890 \text{ Pa}$
  - $1 \text{ psf} = 47.8 \text{ Pa}$

# Historický vývoj <sup>1</sup>

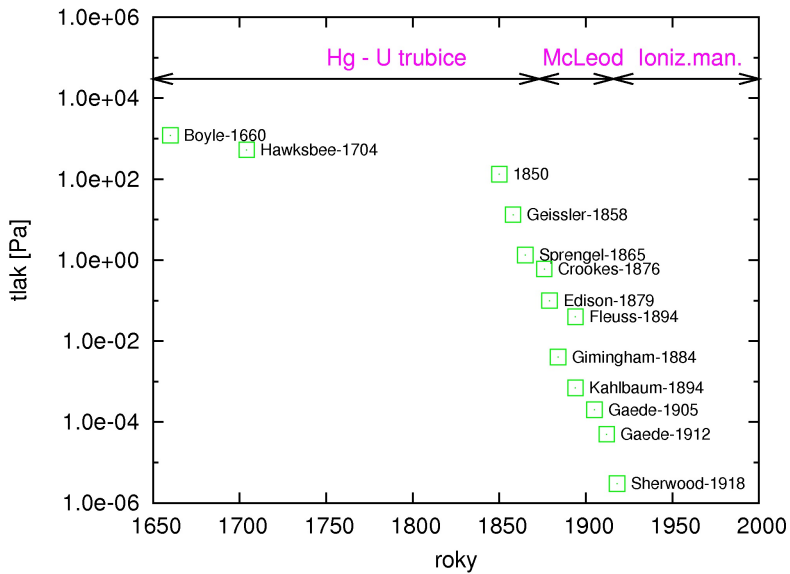
- 1643 - E.Torricelli, první vakuum
- 1654 - O. von Guericke, Magdeburské polokoule
- 1855 - Geissler, výboje v plynech, rtuťová vývěva
- 1874 - H.G.Mac-Leod, kompresní manometr
- 1892 - Fleussova pístová vývěva, průmyslová výroba žárovek
- 1892 - Dewarova nádoba
- 1906 - Pirani, tepelný manometr
- 1912 - W. Gaede, molekulární vývěva
- 1913 - W. Gaede, difúzní vývěva
- 1916 - Buckley, ionizační manometr
- 1925 - Fyzika nízkých tlaků, jako samostatný obor
- 1926 - olejová difúzní vývěva

---

<sup>1</sup><http://www.svc.org/HistoryofVacuumCoating/History-of-Vacuum-Coating.cfm>

- 1929 - kapacitní manometr
- 1936 - neopren
- 1936 - Penning, výbojový manometr s magnetickým polem
- 1950 - Bayard-Alpert - ionizační manometr se žhavenou katodou
- 1954 - Alpert - Omegatron
- 1958 - Becker, turbomolekulární vývěva
- 1967 - komerční kvadrupólový spektrometr

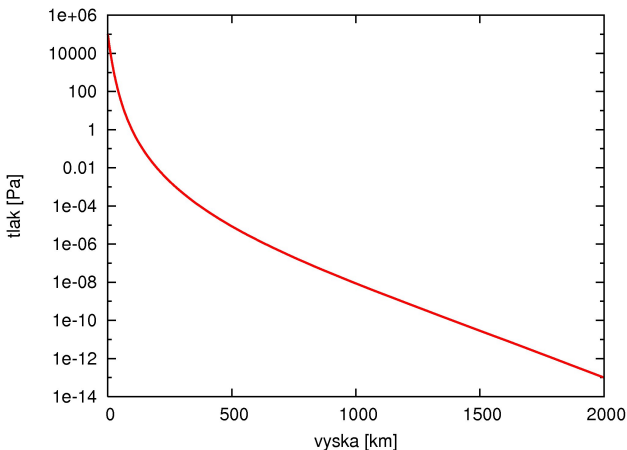




# Závislost tlaku na nadmořské výšce

výška [km]	tlak [mbar]	tlak [Pa]
0	$10^3$	$10^5$
11	$10^2$	$10^4$
50	$10^{-2}$	$10^0$
100	$10^{-3}$	$10^{-1}$
200	$10^{-6}$	$10^{-4}$
500	$10^{-8}$	$10^{-6}$
1000	$10^{-10}$	$10^{-8}$
2000	$10^{-15}$	$10^{-13}$

# Závislost tlaku na nadmořské výšce



Tlak na Měsíci  $1 \text{ nPa} = 10^{-9} \text{ Pa}$

Tlak v mezihvězdném prostoru  $100 \text{ } \mu\text{Pa} - 3 \text{ fPa}, 10^{-4} \text{ Pa} - 3 \times 10^{-15} \text{ Pa}$

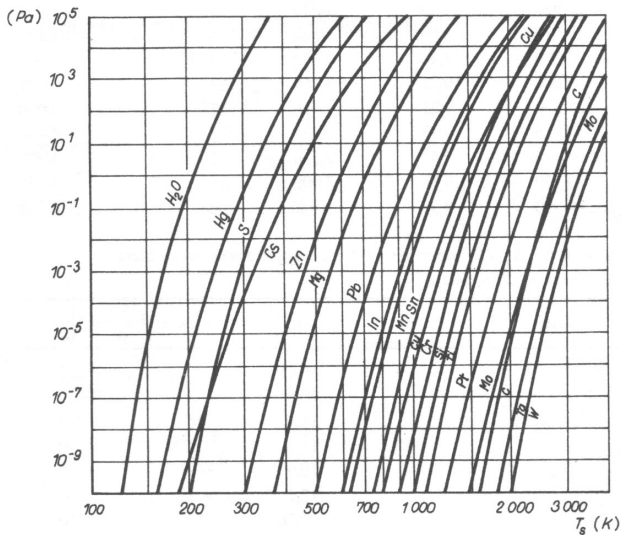
# Rozdělení vakua

vakuum	tlak [mbar]	tlak [Pa]
nízké, hrubé, technické	$10^3 - 10^0$	$10^5 - 10^2$
střední (FV)	$10^0 - 10^{-3}$	$10^2 - 10^{-1}$
vysoké (HV)	$10^{-3} - 10^{-7}$	$10^{-1} - 10^{-5}$
velmi vysoké (UHV)	$10^{-7} - 10^{-10}$	$10^{-5} - 10^{-8}$
extrémně vysoké (XHV)	$< 10^{-10}$	$< 10^{-8}$

# Rozdělení vakua

vakuum	nízké	střední (FV)	vysoké (HV)	UHV, XHV
tlak [Pa]	$10^5 - 10^2$	$10^2 - 10^{-1}$	$10^{-1} - 10^{-5}$	$< 10^{-5}$
$n [cm^{-3}]$	$10^{19} - 10^{16}$	$10^{16} - 10^{13}$	$10^{13} - 10^9$	$< 10^9$
$\lambda [cm]$	$< 10^{-2}$	$10^{-2} - 10^1$	$10^1 - 10^5$	$> 10^5$
$\tau [s]$	$< 10^{-5}$	$10^{-5} - 10^{-2}$	$10^{-2} - 10^2$	$> 10^2$
proudění	viskózní	Knudsenovo	molekulární	molekulární

# Tenze par



# Využití vakua

Vědecké aplikace

Průmyslové aplikace

# Využití vakua - vědecké aplikace

- astronomie - dalekohledy
- diagnostické metody - elektronový mikroskop, hmotnostní spektrometr, optický vakuový spektrometr, XPS, ...
- fyzika plazmatu - výboje v plynech, ...
- chemie - filtrace, vakuová destilace, čisté materiály, ...
- metrologie - etalony pro kalibrace
- tenké vrstvy - napařování, naprašování
- plazmochemické reaktory
- fyzika nízkých teplot
- urychlovače částic - synchrotrony, LHC, ...
- termojaderné reaktory - ITER, ...
- základní výzkum - simulátory kosmického prostoru, pádová věž, Casimirův jev, ...



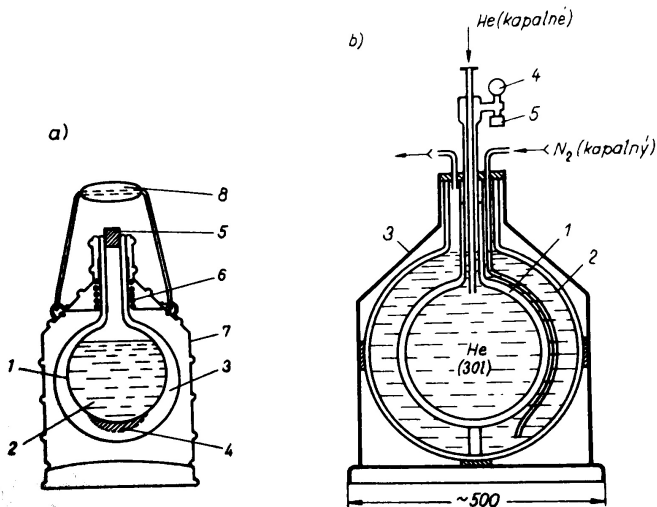
# Hubble Space Telescope <sup>3</sup>

- výroba 1977-1979
- broušení 1979-1981
- průměr 2,4 m, celková hmotnost 11 t
- přesnost broušení 30 nm
- odrazné vrstvy - Al 76.2 nm, fluorid hořčíku - 25.4 nm
- vypuštění - 24.4.1990, let STS 31



<sup>3</sup>[http://en.wikipedia.org/wiki/Hubble\\_Space\\_Telescope](http://en.wikipedia.org/wiki/Hubble_Space_Telescope)

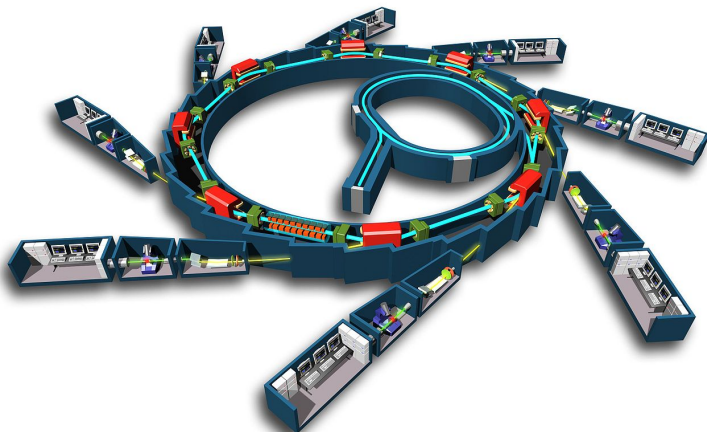
# Dewarova nádoba



# Urychlovače částic

- velká střední volná dráha
- LHC, synchrotrony, ...
- základní výzkum - částicová fyzika, materiály, biologie, medicína
- farmaceutický průmysl
- léčení rakoviny

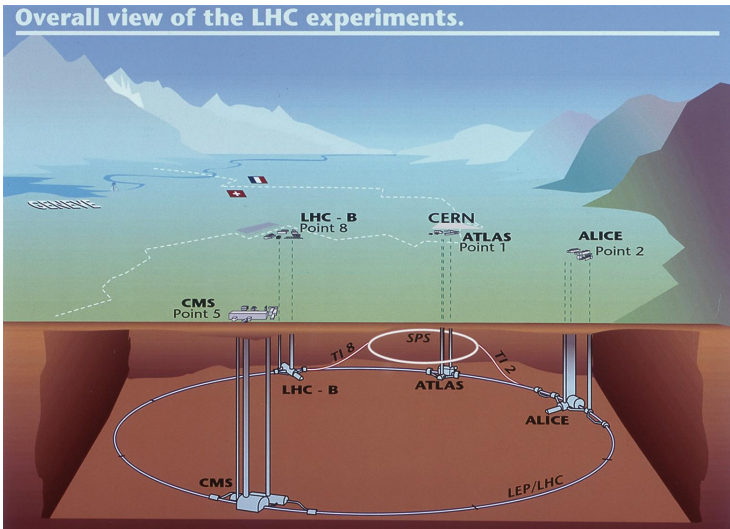
# Synchrotron



5

<sup>5</sup><http://en.wikipedia.org/>

# LHC <sup>6</sup>



<sup>6</sup> <http://lhc.web.cern.ch/lhc/>

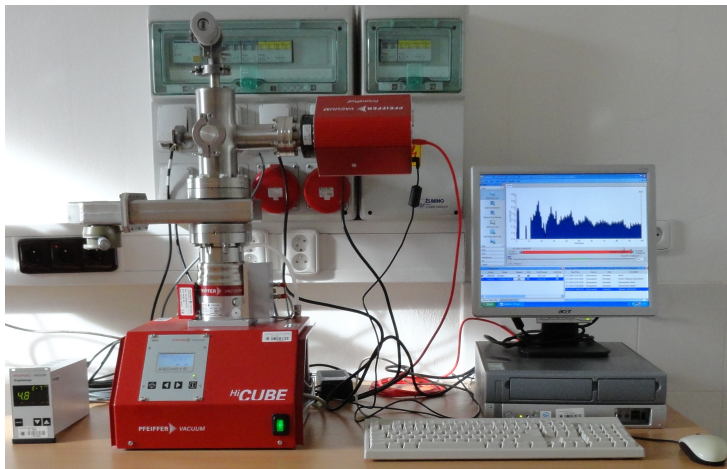
# Elektronové mikroskopy

- katoda - termoemisní  $< 10^{-2} Pa$
- katoda - autoemisní studená emise  $< 10^{-8} Pa$
- Schottkyho katoda  $< 10^{-6} Pa$
- prodloužení životnosti, vyšší stabilita, užší svazek elektronů
- výhody autoemise - nižší rozptyl energií elektronů  $\implies$  menší stopa, větší rozlišení

# Napařovačka

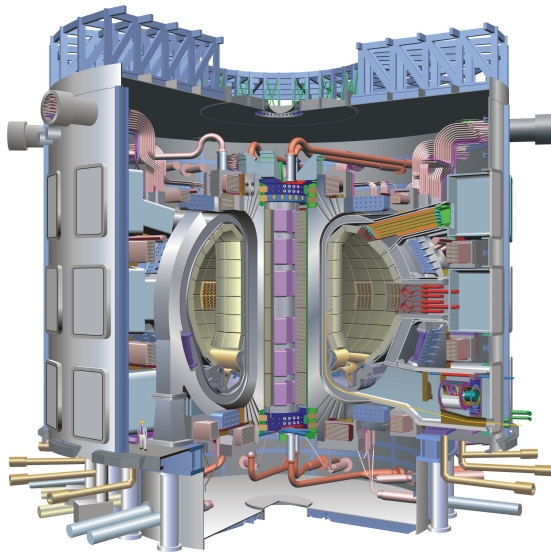


# Hmotnostní spektrometr

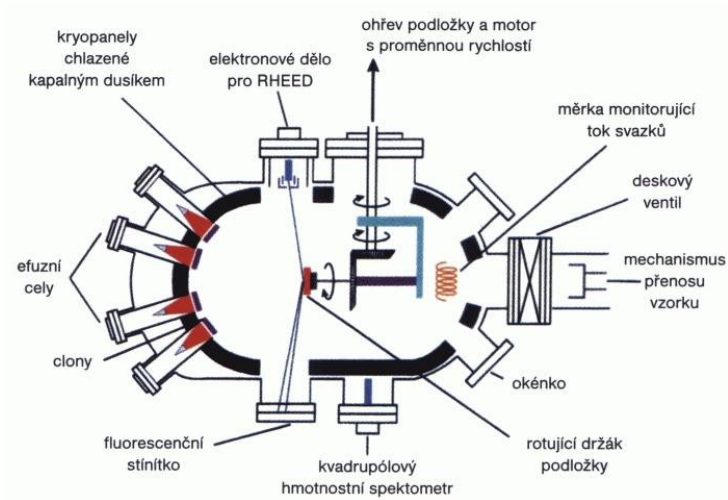




# ITER - 840 m<sup>3</sup> <sup>7</sup>



# Molecular Beam Epitaxy <sup>8</sup>



<sup>8</sup> <http://www.fzu.cz/oddeleni/povrchy/mbe/index.html>

# Experiment na orbitální dráze

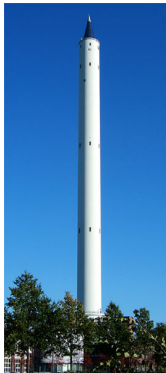
- tlak na oběžné dráze raketoplánu ( 500 km)  $10^{-6}$  Pa
- za štítem o průměru 3.6 m ,  $10^{-12}$  Pa
- 1994 - WSF1 - porucha orientace, STS60 <sup>9</sup>
- 1995 - WSF2 - porucha MBE, STS69
- 1996 - WSF3 - úspěch 7 vrstev GaAs/AlGaAs, STS80



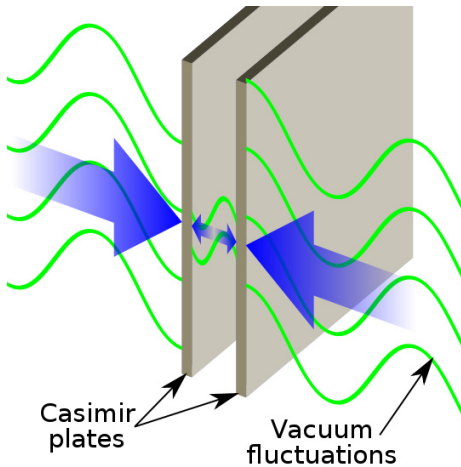
<sup>9</sup>[http://mek.kosmo.cz/pil\\_lety/usa/sts/sts-60/index.htm](http://mek.kosmo.cz/pil_lety/usa/sts/sts-60/index.htm)

# Pádová věž

- ZARM - Brémy
- výška 146 m, průměr 3.5 m, celkem objem 1700 m<sup>3</sup>
- 18 vývěv, čerpací rychlost 32 000 m<sup>3</sup>/h, tlak 10 Pa
- doba pádu asi 5 s



# Casimirův jev



11

<sup>11</sup><http://en.wikipedia.org/wiki/>

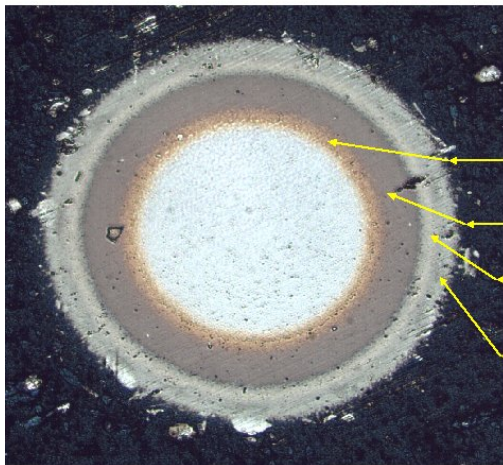
# Využití vakua - průmyslové aplikace

- osvětlovací technika - žárovky, zářivky, úsporné žárovky
- vytváření tenkých vrstev - okna, brýle, zrcadla, ...
- barierové vrstvy na lahve
- elektronika
- chemický průmysl - vakuová destilace ropy,...
- metalurgie - čisté kovy, nitridace,...
- vakuové manipulátory, pinzety,...
- kryogenní technika - tepelná izolace
- vakuové balení potravin
- regenerace transformátorových olejů
- svařování e-svazkem
- lisování plastických hmot
- odlévání plastických hmot

# Tenké vrstvy <sup>12</sup>



<sup>12</sup>" <http://www.shm-cz.cz/>"



**TiN- adhesive layer**

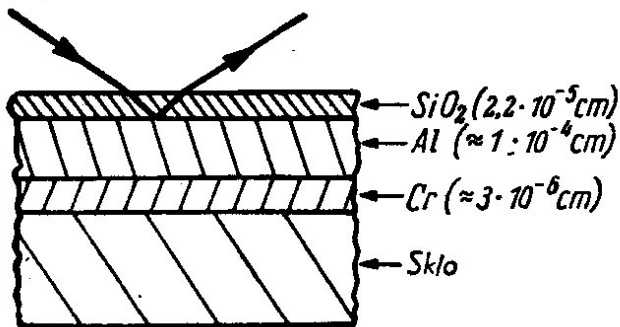
**TiAlN – layer with max. hardness**

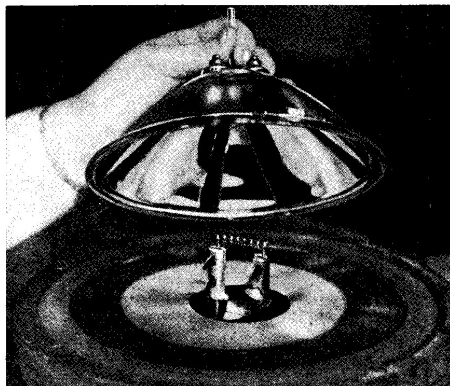
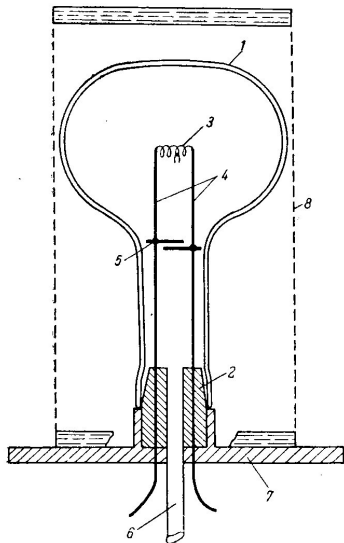
**TiAlCO I – layer with optimal stechiometry**

**AlTiCO II – layer with low friction coefficient - LUBRIK**



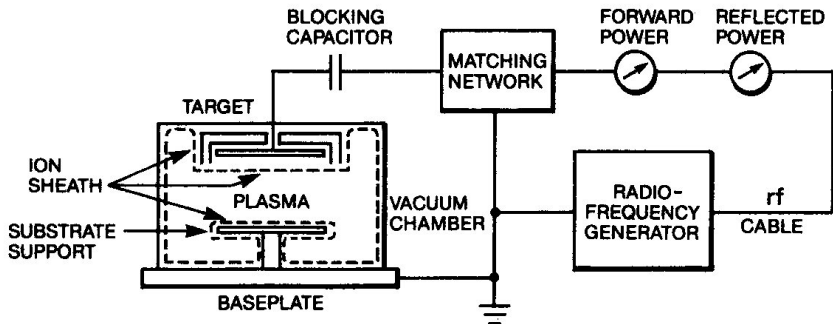
## Zrcadlové plochy





Obr. 10-218. Odber pohliníkováného reflektora (pozri obr. 10-216) z naparovacieho zariadenia. Snímka závodu: General Electric Comp. (pozri Rose).

# PACVD



16

<sup>16</sup>R.V.Stuart: Vacuum technology Thin Films and Sputtering, Academic Press 1983

# Výroba CD-ROM, DVD, ...<sup>17</sup>



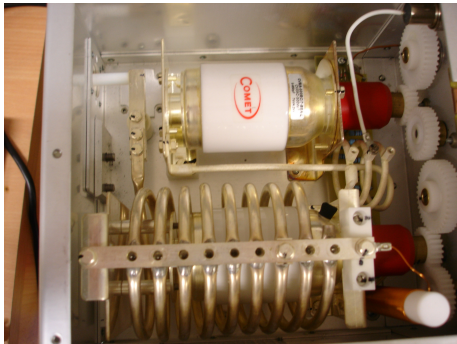
<sup>17</sup>" <http://www.pfeiffer-vacuum.net/>"

# Barierová vrstva při výrobě plastových lahví PET

- transparentní barierová vrstva  $SiO_x$
- zlepšení vlastností plastů
- zabránit pronikání plynů zejména  $O_2$  a  $CO_2$
- PACVD - mikrovlnné plazma
- kapacita  $\sim 10000$  lahví za hodinu

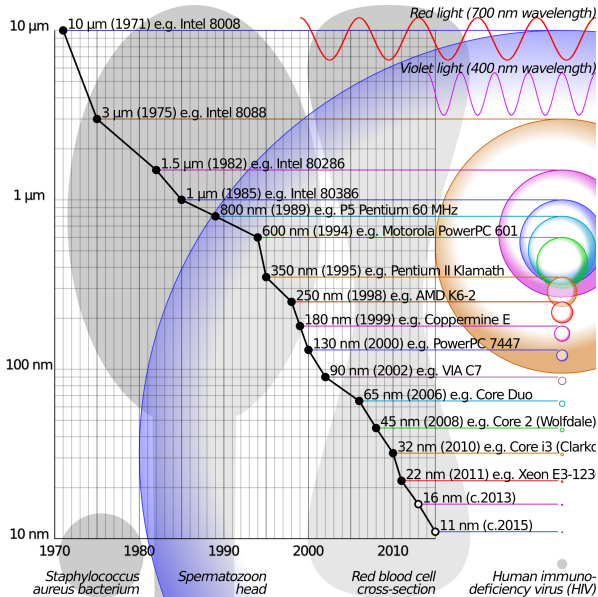
# Elektronika

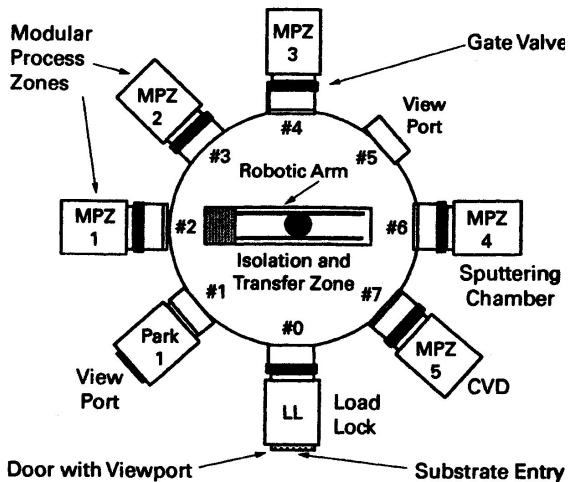




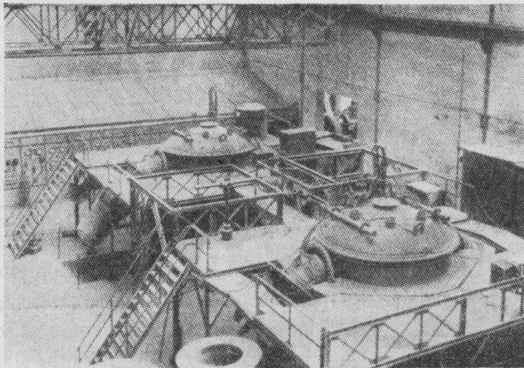








# Metalurgie



Obr. 9,2-6. Vákuová taviaca pec pre vsádzku 4 t s vákuovotesne nasadenými kokilami  
(Rohn; výrobca: Heraeus Vacuumschmelze).

# Závěr

Podle dané aplikace a tlaku, který potřebujeme musíme vybrat:

- vakuový čerpací systém - typ vývěv, čerpací rychlosti, ...
- manometry pro měření tlaku
- materiály pro konstrukci aparatury