

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
- P.Slavíček a kol.: Vakuova fyzika 1, Munipress 2016
- Zpravodaje CVS
- firemní katalogy
- internet: [www - stránky výrobců vakuové techniky, ...](#)

Úvod

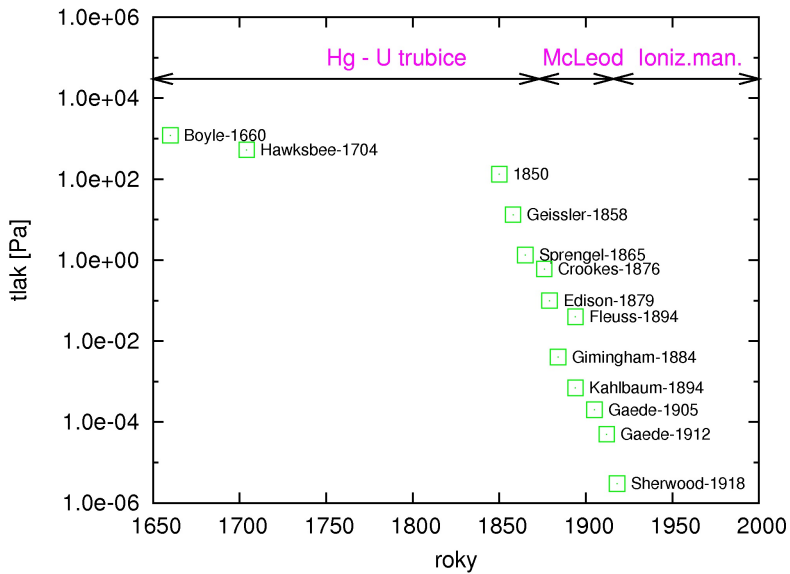
- Vakuum je označení pro stav systému, který obsahuje plyny, nebo páry, pokud je jejich tlak menší než tlak atmosférický.
- Jednotky tlaku:
 - **Pa [Nm⁻²] - jednotka v soustavě SI**
 - 1 bar = 10⁵ Pa
 - 1 mbar = 100 Pa
 - 1 torr = 133,322 Pa
 - 1 atm = 101325 Pa = 760 torr (fyzikální atmosféra)
 - 1 at = 98066,5 Pa = 0,96784 atm (technická atmosféra)
 - 1 psi = 6890 Pa
 - 1 psf = 47,8 Pa

Historický vývoj

- 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 - M. Pirani, Piraniho 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

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

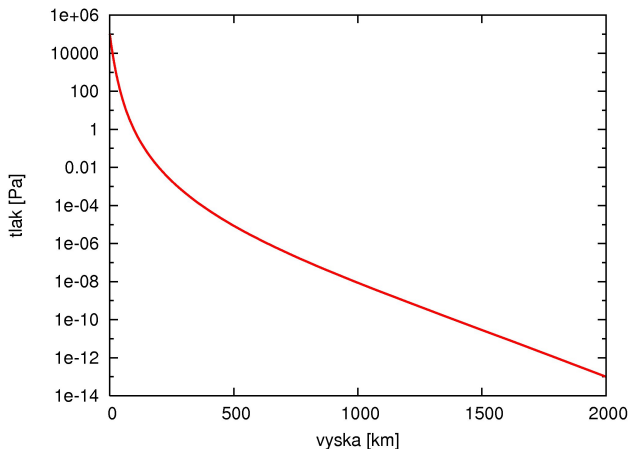
- 1929 - kapacitní manometr
- 1933 - neopren
- 1936 - Penning, výbojový manometr s magnetickým polem
- 1950 - Bayard-Alpert - ionizační manometr se žhavenou katodou
- 1958 - Becker, turbomolekulární vývěva
- 1967 - komerční kvadrupólový spektrometr
- 1973 - Scroll vývěva
- 1982 - viskózní manometr s rotující kuličkou



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

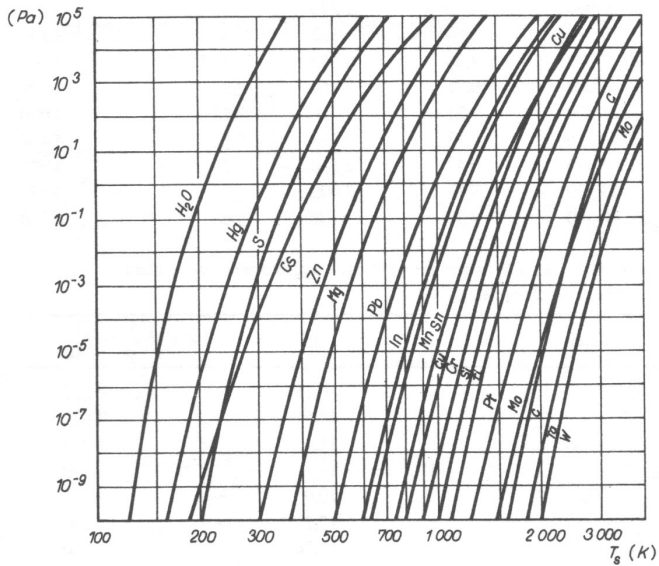
Rozdělení vakua

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}]	$10^{19} - 10^{16}$	$10^{16} - 10^{13}$	$10^{13} - 10^9$	$< 10^9$
λ [cm]	$< 10^{-2}$	$10^{-2} - 10^1$	$10^1 - 10^5$	$> 10^5$
τ [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

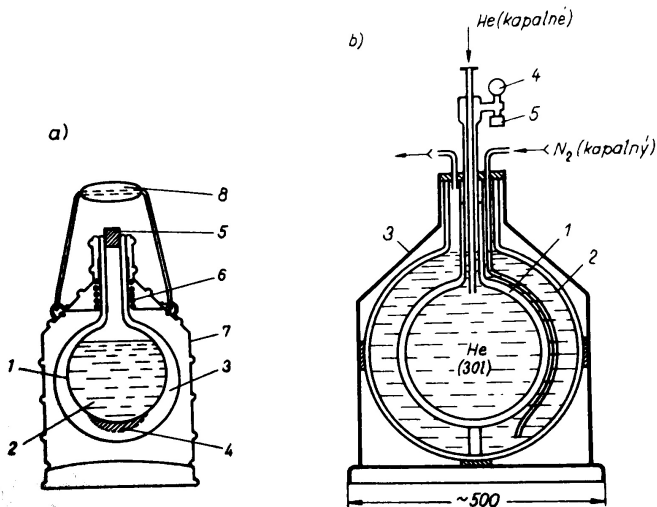
- astronomie - dalekohledy
- diagnostické metody - elektronový mikroskop, hmotnostní spektrometr, optický vakuový spektrometr, XPS, ...
- fyzika plazmatu - výboje v plynech, ...
- chemie - filtrace, vakuová destilace, čisté materiály, ...
- metrologie - etalony pro kalibrace
- tenké vrstvy - napařování,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

Hubble Space Telescope

- 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



Dewarova nádoba

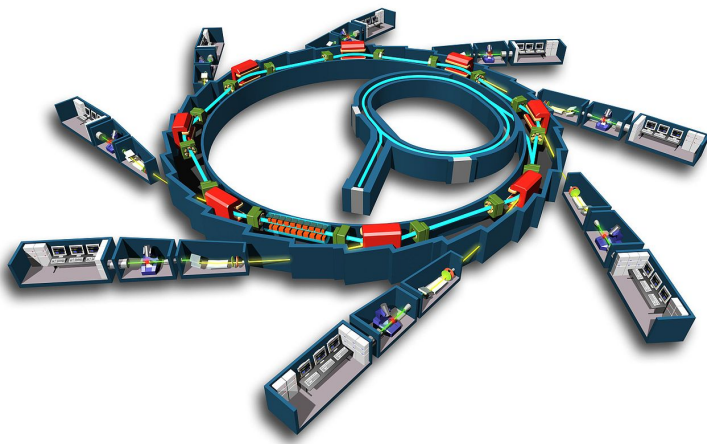


J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981

Urychlovače částic

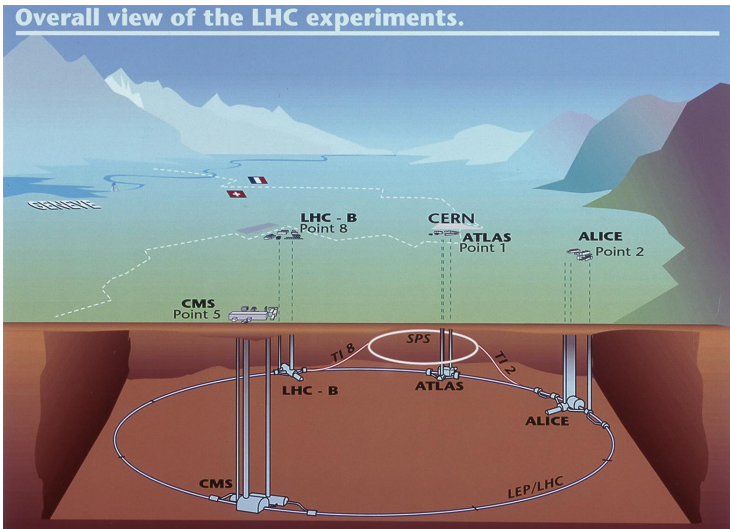
- velká střední volná dráha
- LHC, synchrotrony, ...
- základní výzkum - částicová fyzika, materiály, biologie, medicína
- farmaceutický průmysl
- léčení rakoviny

Synchrotron



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

LHC



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

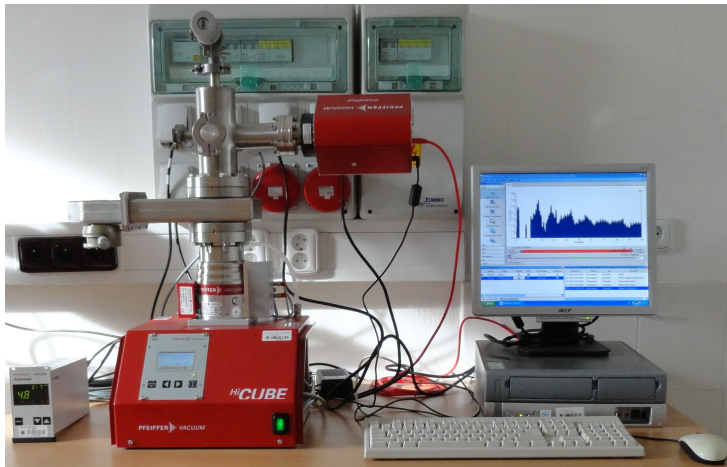
Elektronové mikroskopy

- 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

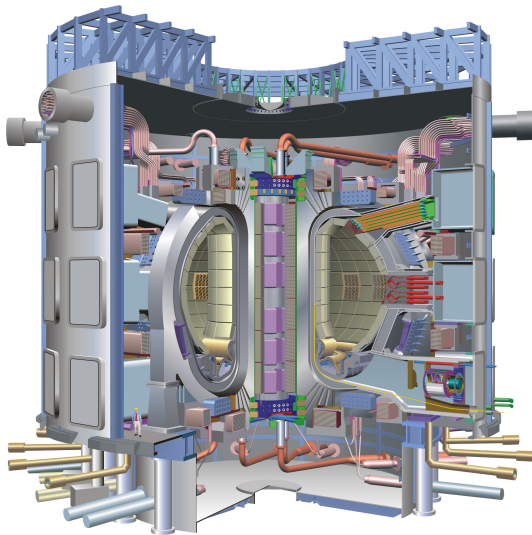


Hmotnostní spektrometr

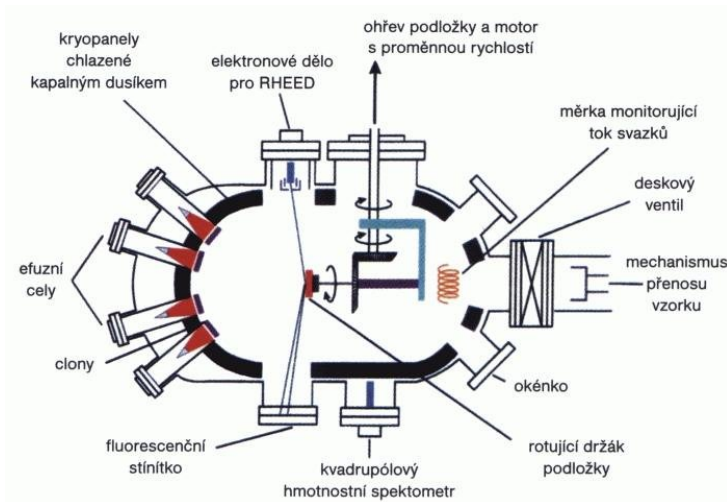


ITER

plazma: 840 m³, vakuov komora: 1400 m³, celkem vakuov: 8500 m³



Molecular Beam Epitaxy



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

Experiment na orbitální dráze

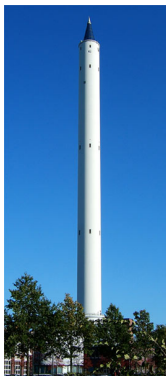
- tlak na oběžné dráze raketoplánu (500 km) 10^{-6} Pa
- za štítem o průměru 3,6 m , 10^{-12} Pa
- 1994 - WSF1 - porucha orientace, STS60
- 1995 - WSF2 - porucha MBE, STS69
- 1996 - WSF3 - úspěch 7 vrstev GaAs/AlGaAs, STS80



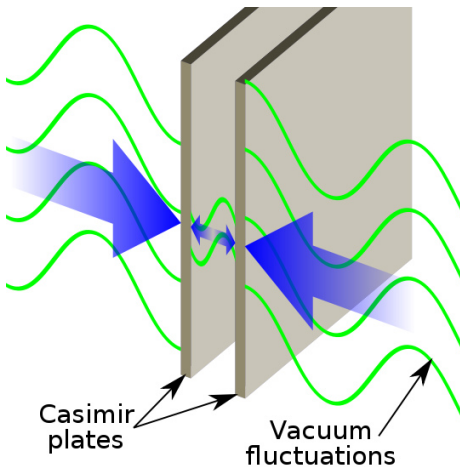
http://mek.kosmo.cz/pil_lety/usa/sts/sts-60/index.htm

Pádová věž

- ZARM - Brémy
- výška 146 m, průměr 3,5 m, celkem objem 1700 m³
- 18 vývěv, čerpací rychlost 32 000 m³/h, tlak 10 Pa
- doba pádu asi 5 s



Casimirův jev



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

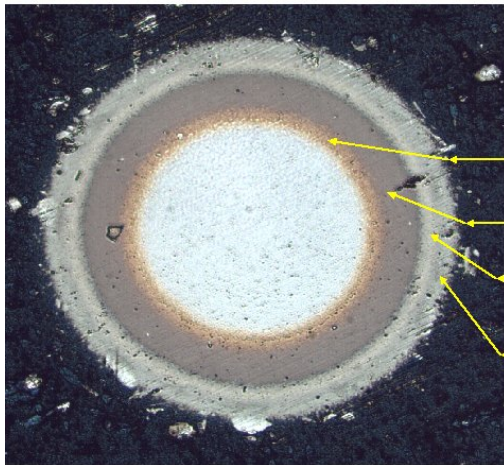
Využití vakua - průmyslové aplikace

- 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



<http://www.shm-cz.cz/>



TiN- adhesive layer

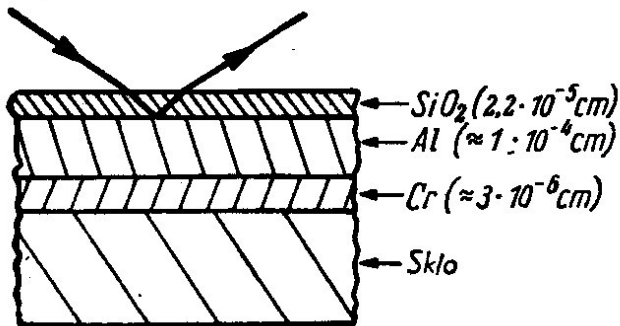
**TiAlN – layer with max.
hardness**

**TiAlCO I – layer with
optimal stechiometry**

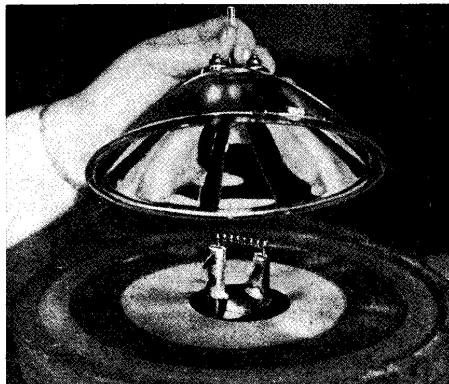
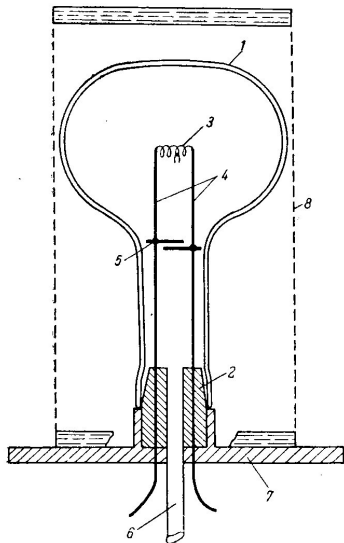
**AlTiCO II – layer with
low friction coefficient -
LUBRIK**

<http://www.shm-cz.cz/>

Zrcadlové plochy



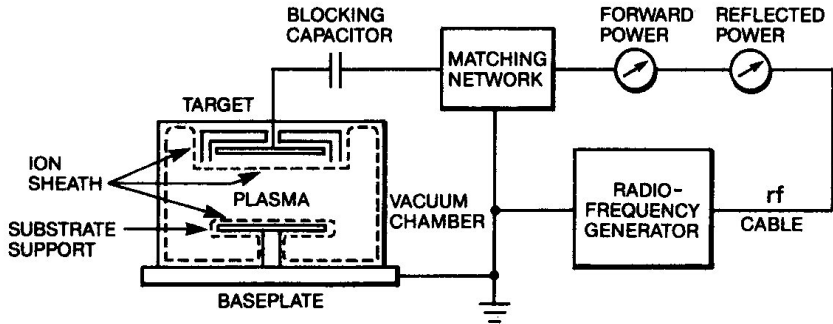
W. Espe: Technologia hmot vákuovej techniky, SAV, Bratislava 1960



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

W. Espe: Technológia hmot vákuovej techniky, SAV, Bratislava 1960

PACVD



R.V.Stuart: Vacuum technology Thin Films and Sputtering, Academic Press 1983

Výroba CD-ROM, DVD, ...



Multi Layer Metalizer

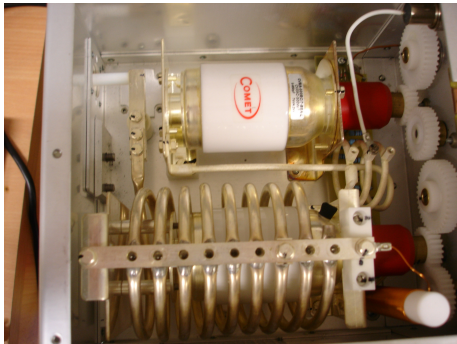
- ▶ DVD-RAM, DVD±RW, DVD Blue-ray, and CD-RW sputtering system
- ▶ 9 sputtering chambers, 9 relaxation chambers, and 1 load-lock
- ▶ Very high layer uniformity
- ▶ Low disk temperature
- ▶ Disk rotates during the deposition for minimum layer's roughness
- ▶ All-in-one plug & play system

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 ~ 10000 lahví za hodinu

Elektronika



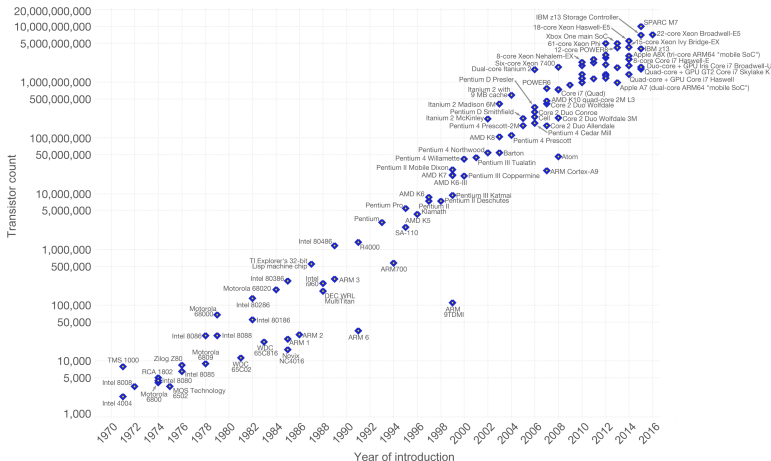


Aplikace v mikroelektronice

Moore's Law – The number of transistors on integrated circuit chips (1971-2016)

Our World
in Data

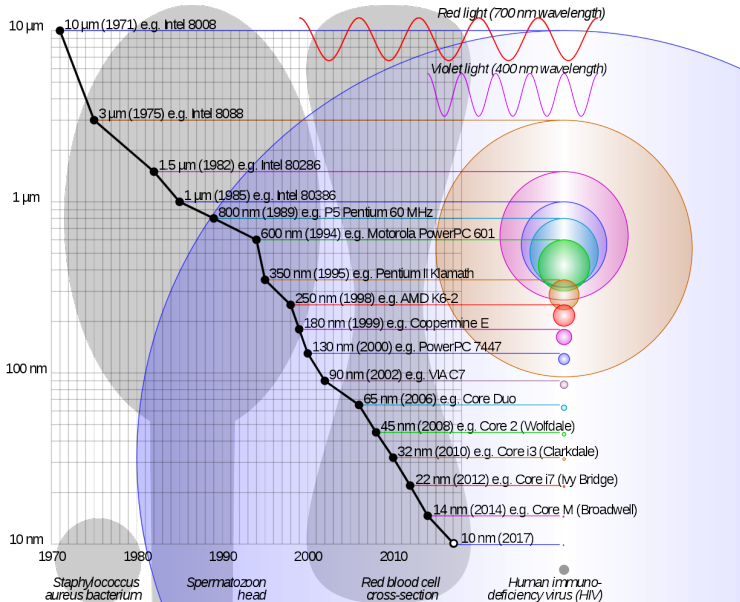
Moore's law describes the empirical regularity that the number of transistors on integrated circuits doubles approximately every two years. This advancement is important as other aspects of technological progress – such as processing speed or the price of electronic products – are strongly linked to Moore's law.



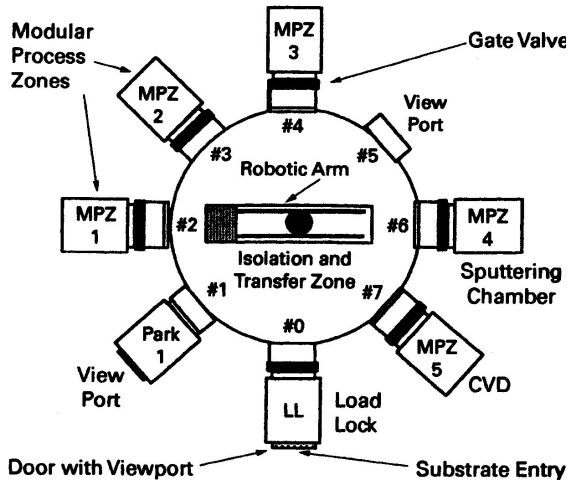
Data source: Wikipedia (https://en.wikipedia.org/wiki/Transistor_count)

The data visualization is available at [OurWorldInData.org](https://ourworldindata.org). There you find more visualizations and research on this topic.

Licensed under CC-BY-SA by the author Max Roser.

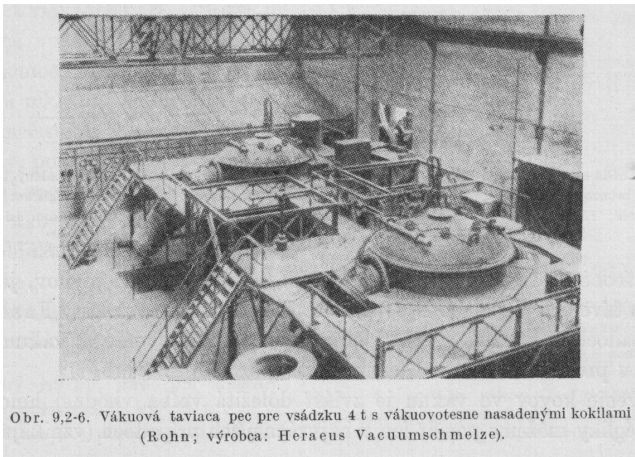


<http://en.wikipedia.org>



F.OHanlon: A Users Guide to Vacuum Technology, Wiley (2003)

Metalurgie



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

W. Espe: Technológia hmot vákuovej techniky, SAV, Bratislava 1960

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