

# Plazma v laboratoři za nízkého i atmosférického tlaku

R. Přibyl, J. Kelar

MUNI **CEPLANT**

# Obsah

- Plazma v přírodě
- Plazma – fyzikální i nefyzikální definice
- Nízkotlakové plazma
- Atmosferické plazma

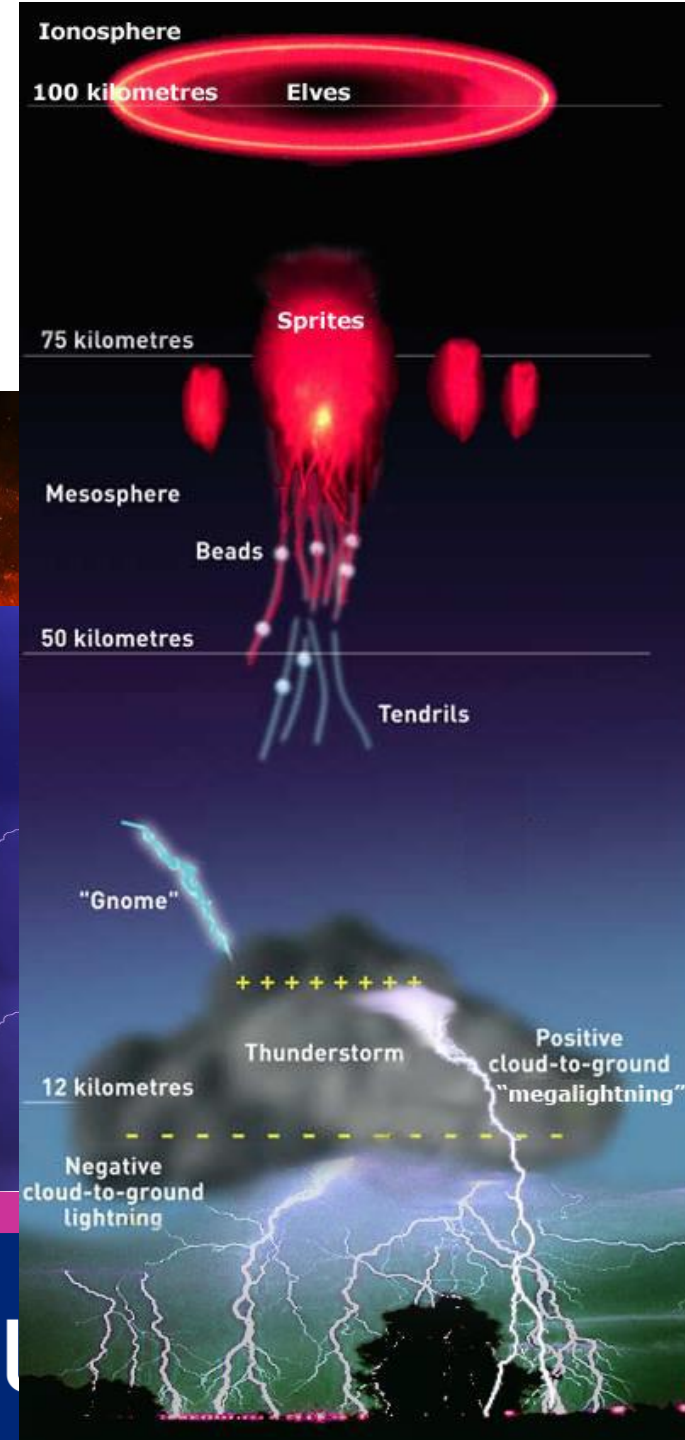
# Obsah

- Plazma v přírodě
- Plazma – fyzikální i nefyzikální definice
- Nízkotlakové plazma
- Atmosferické plazma

# Plazma v přírodě

## ▪ Na Zemi:

- Ionosféra (viditelná Polární záře)
- Plazma v 75-100 km
- Blesky



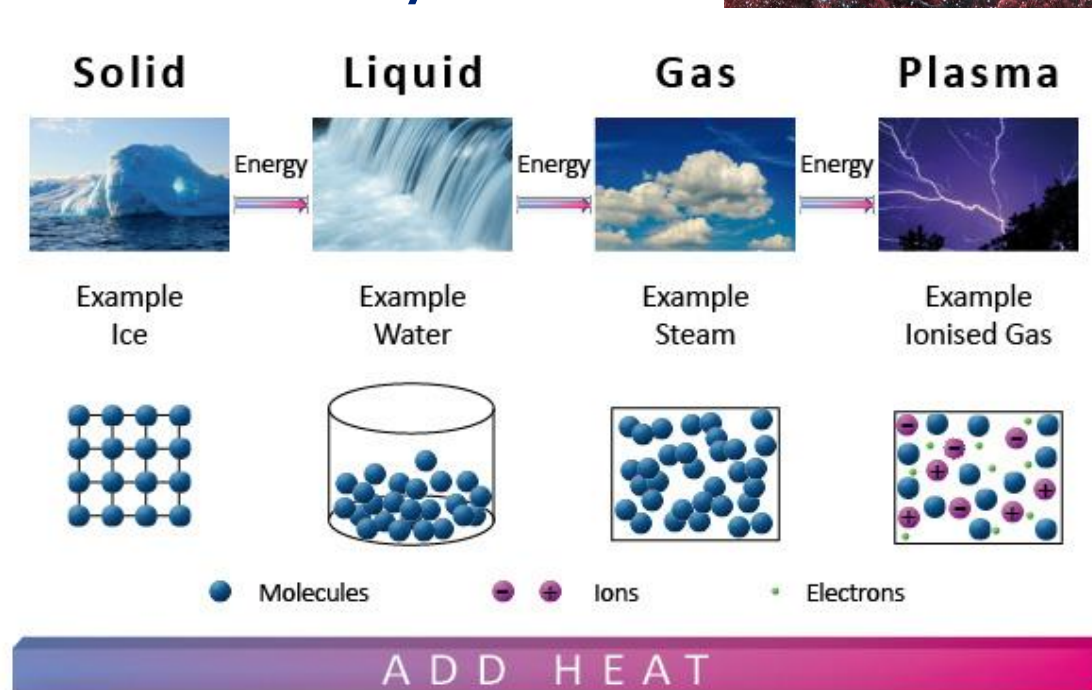
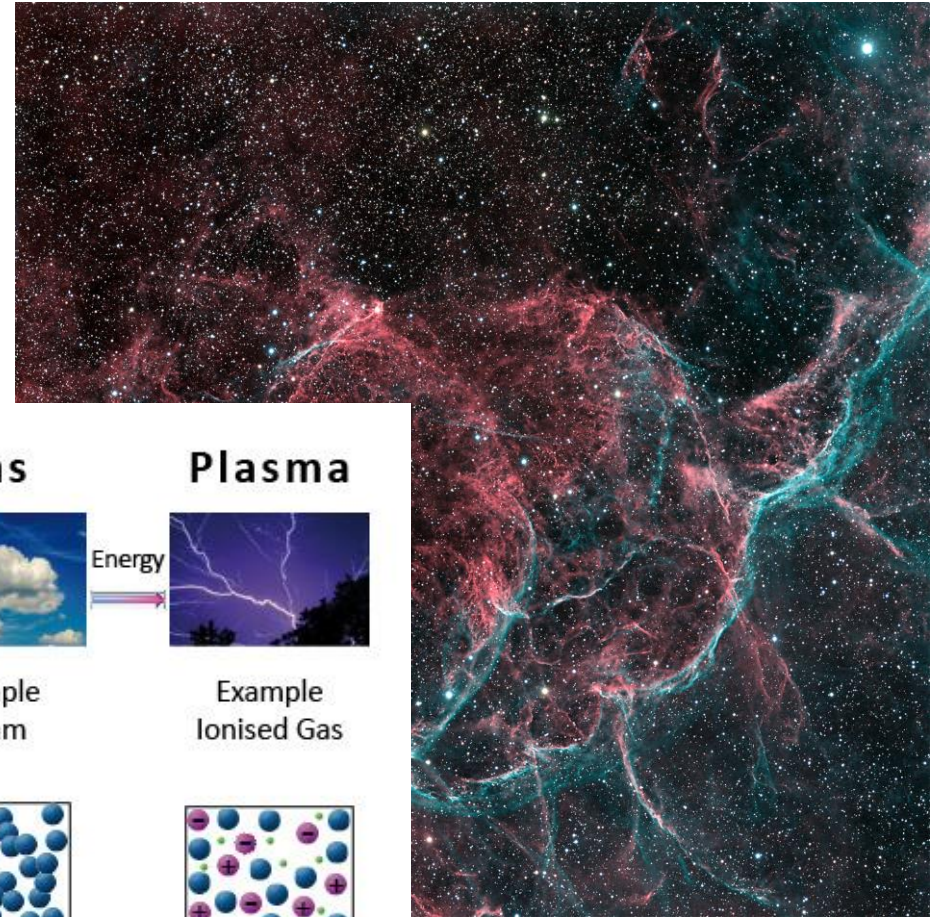
# Plazma

~~Čtvrté skupenství hmoty~~

První stav hr

Kvazineutrál

Generujeme



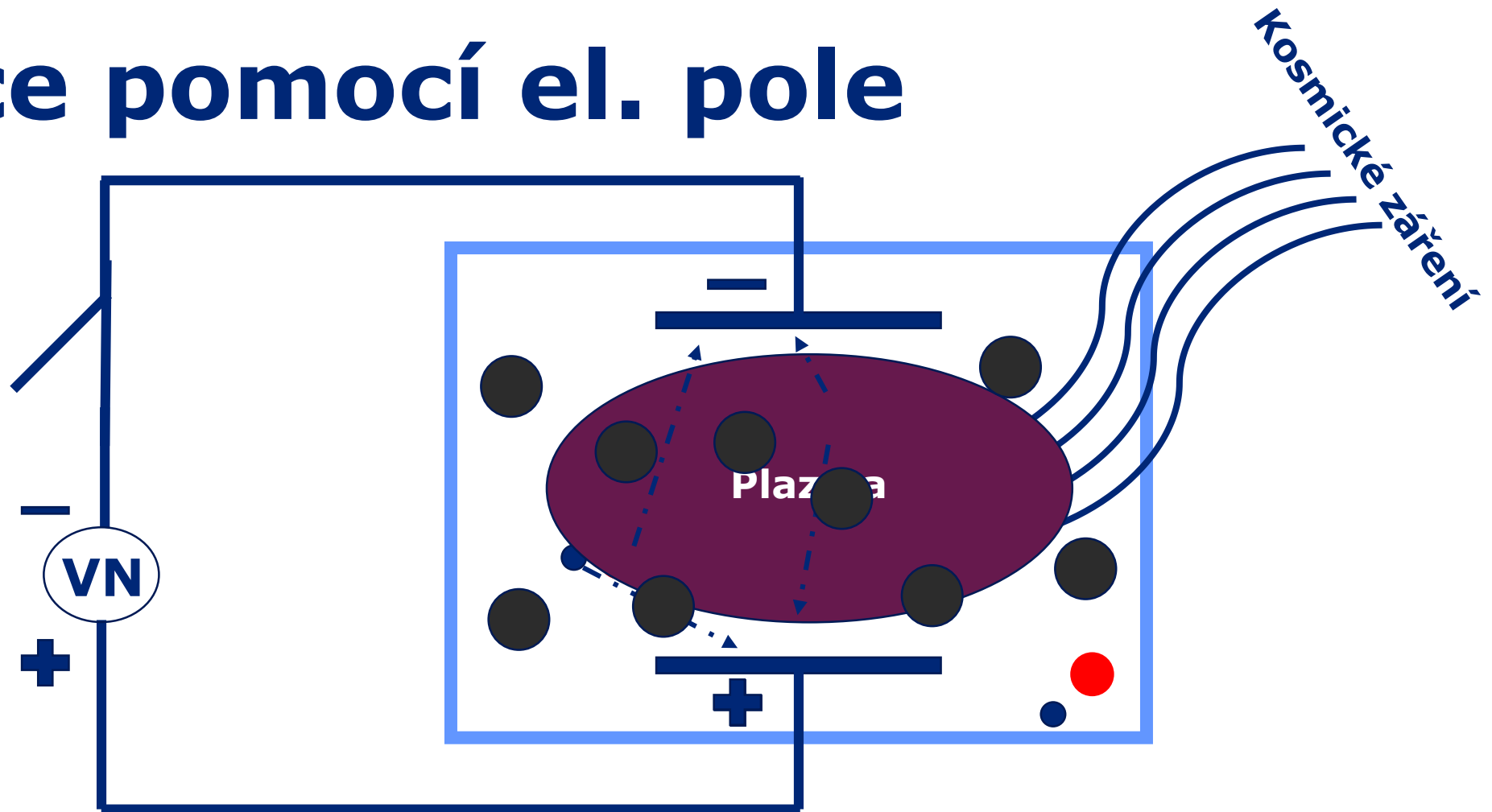
<https://www.britannica.com/science/phase-state-of-matter>

# Plazma – 4 podmínky existence

- Kvazineutralita:  $n_+ \approx n_-$
- Rozměry plazmatu:  $l \gg h_D = \sqrt{\frac{\epsilon k T}{n e^2}}$
- Počet částic:  $\frac{4}{3} \pi h_D^3 n \gg 1$
- $\omega_e \gg \nu_{en}$

# Ionizace pomocí el. pole

- Neutrální částice
- Kladná částice
- Záporná částice

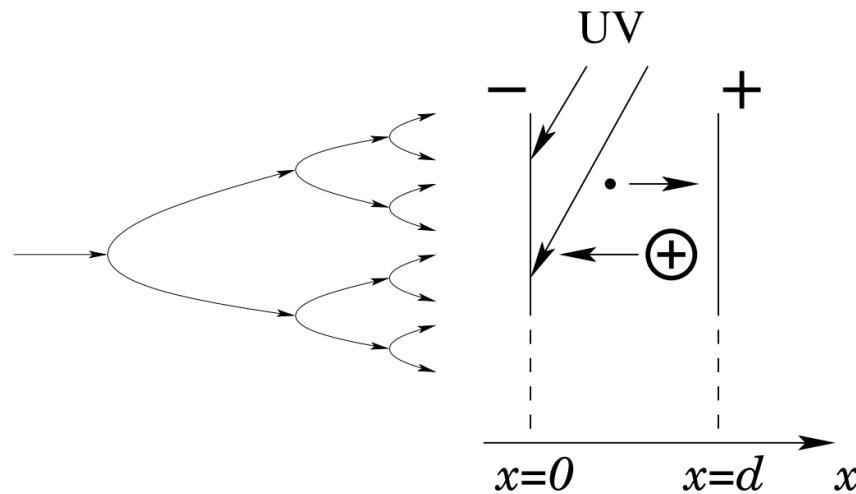
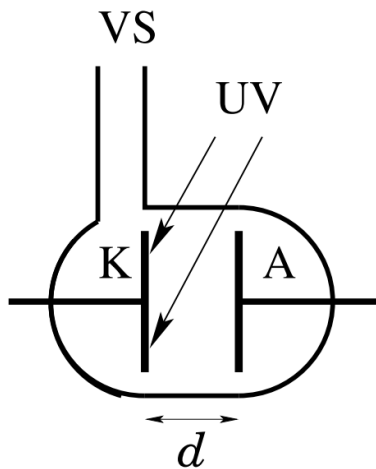


# Plazma v našich laboratořích

- Neizotermické:  $T_e \neq T_i \neq T_n$
- Nízkoteplotní:  $T_g < 10000 \text{ K}$   
 $T_e \approx 1 - 10 \text{ eV}$  (1 eV=11605 K)



# Vysoká teplota elektronů

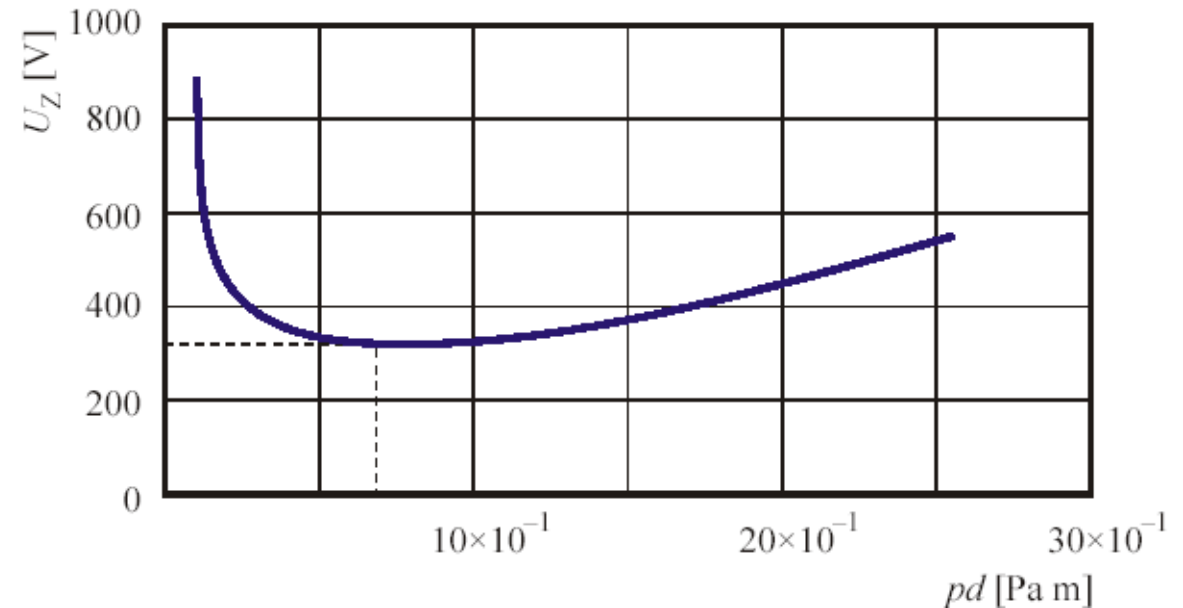


## Srážkové procesy:

- Pružné srážky:  $e^- + A \rightarrow e^- + A$
- **Ionizace:**  $e^- + A \rightarrow A^+ + 2e^-$
- Excitace:  $e^- + A \rightarrow A^* + e^-$
- Rekombinace:  $A^+ + e^- \rightarrow A$
- Disociace:  $e^- + AB \rightarrow e^- + A + B$
- Dis. ionizace:  
 $e^- + AB \rightarrow e^- + A^+ + B$
- Penning. ionizace :  
 $A^* + B \rightarrow e^- + A + B^+$
- **Emise fotonu:**  $A^* \rightarrow h\nu$
- Absorpce:  $A + h\nu \rightarrow A^*$
- Fotoionizace:  $A^* + h\nu \rightarrow A^+ + e^-$
- .....atd.

# Nízký X atmosferický tlak

- $h_D = \sqrt{\frac{\epsilon k T}{n e^2}}$
- Doutnavý výboj:
  - Zákon podobnosti:  $\frac{j}{p^2} = \text{const.}$



# Obsah

- Plazma v přírodě
- Plazma – fyzikální i nefyzikální definice
- **Nízkotlaké plazma**
- Atmosferické plazma

# Nízkotlaké plazma

- Definice vakua
- Výhody a nevýhody
- Využití

# Vakuum – snížený tlak

- Získávání – vývěvy:
  - Rotační olejová
  - Scroll
  - Turbomolekulární
- Měření - manometry:
  - U-trubice
  - Kapacitní
  - Pirani

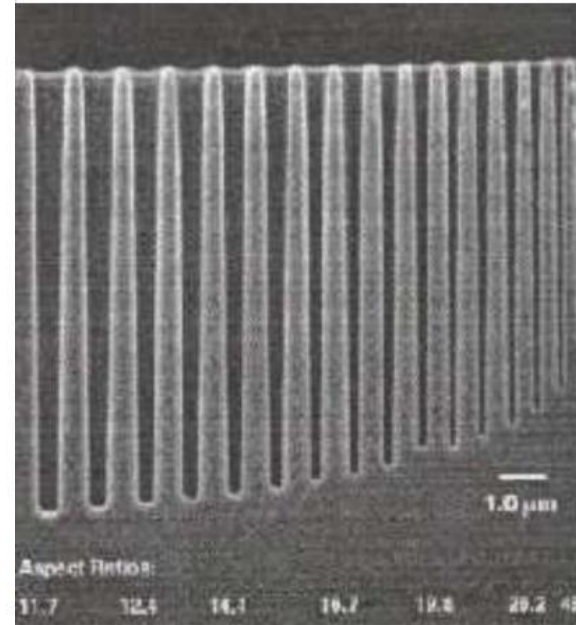
vakuum	tlak [mbar]	tlak [Pa]
nízké, hrubé, technické	$10^3 - 10^0$	$10^5 - 10^2$
střední (FV)	$10^0 - 10^{-3}$	$10^2 - 10^{-1}$
vysoké (HV)	$10^{-3} - 10^{-7}$	$10^{-1} - 10^{-5}$
velmi vysoké (UHV)	$10^{-7} - 10^{-10}$	$10^{-5} - 10^{-8}$
extrémně vysoké (XHV)	$< 10^{-10}$	$< 10^{-8}$

# Nízkotlaké plazma

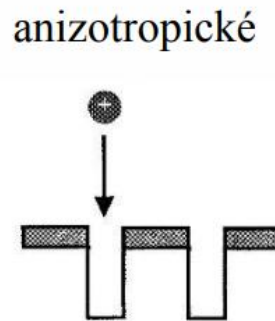
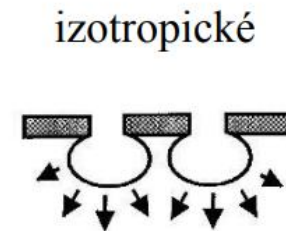
- Nevýhody:
  - Vysoká cena
  - Mobilita aparatur
- Výhody:
  - Definované podmínky
  - Homogenita plazmatu (Zákon podobnosti)

# Aplikace nízkotlakého plazmatu

- Vylepšení konvenčně používaných materiálů pomocí tenkých vrstev
- Tenká vrstva:
  - Tloušťka od 10 nm do 100  $\mu\text{m}$
  - Materiál z plazmatu
- Plazmová modifikace:
  - Hloubka 10 nm
  - Stárnoucí efekt



[https://www.integrta.zcu.cz/download/skola1/liberec\\_kmt\\_prez4.pdf](https://www.integrta.zcu.cz/download/skola1/liberec_kmt_prez4.pdf)



# Metody přípravy tenkých vrstev

- Naprašování (sputtering)
- Plazmochemická depozice z plynné fáze (PECVD)
- Mikrovlnné techniky



# Naprašování

- Magnetron
  - Magnetické pole
  - Tlak 0.1 - 10 Pa
- Analytické aparatury
- Průmyslové aparatury

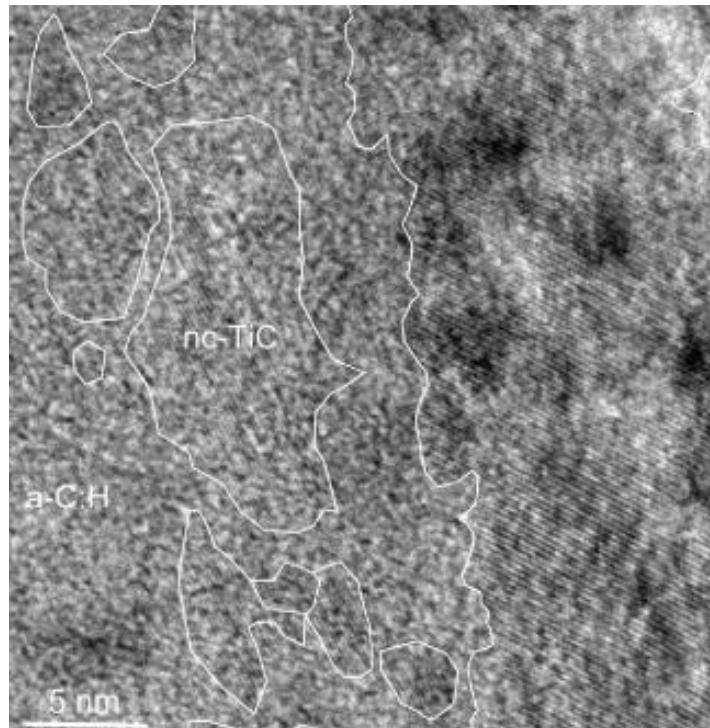


[www.visual-science.com/projects/magnetron-sputtering/technical-illustration/](http://www.visual-science.com/projects/magnetron-sputtering/technical-illustration/)

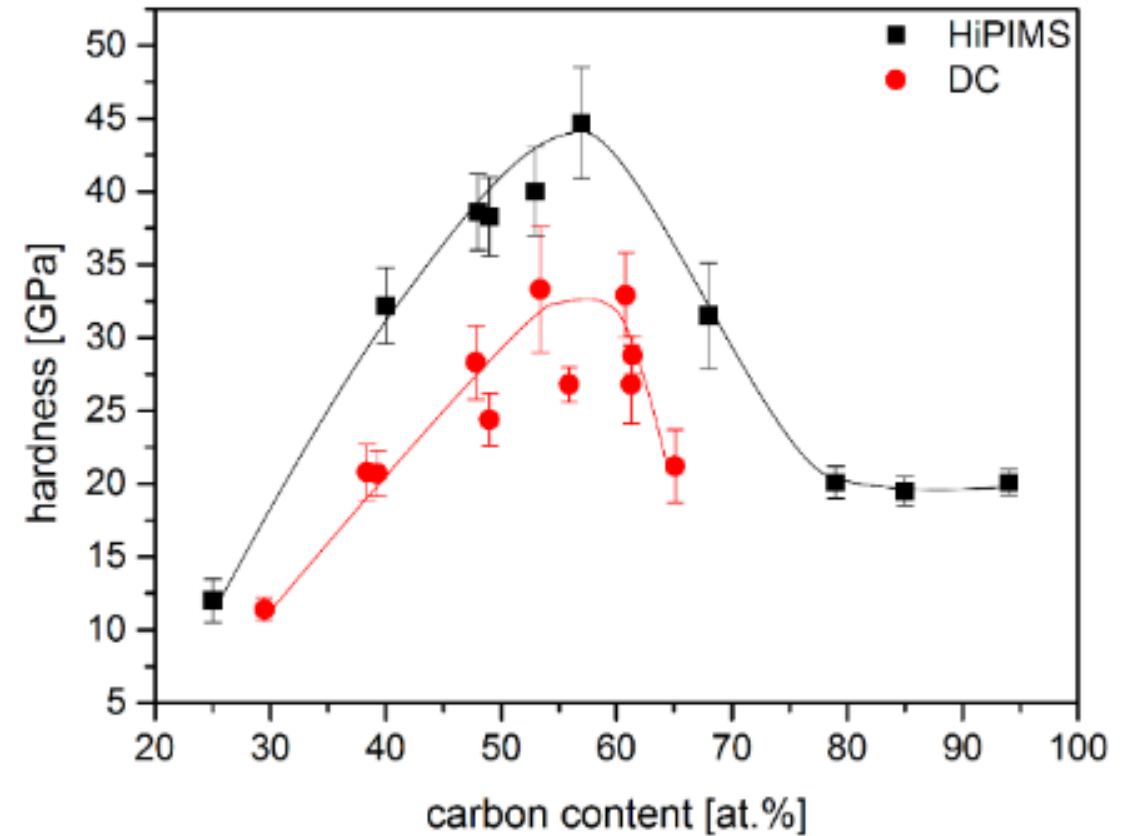
# Magnetronové naprašování

- Depozice vrstev s vylepšenými mechanickými vlastnostmi
- Možnost reaktivního magnetronového naprašování

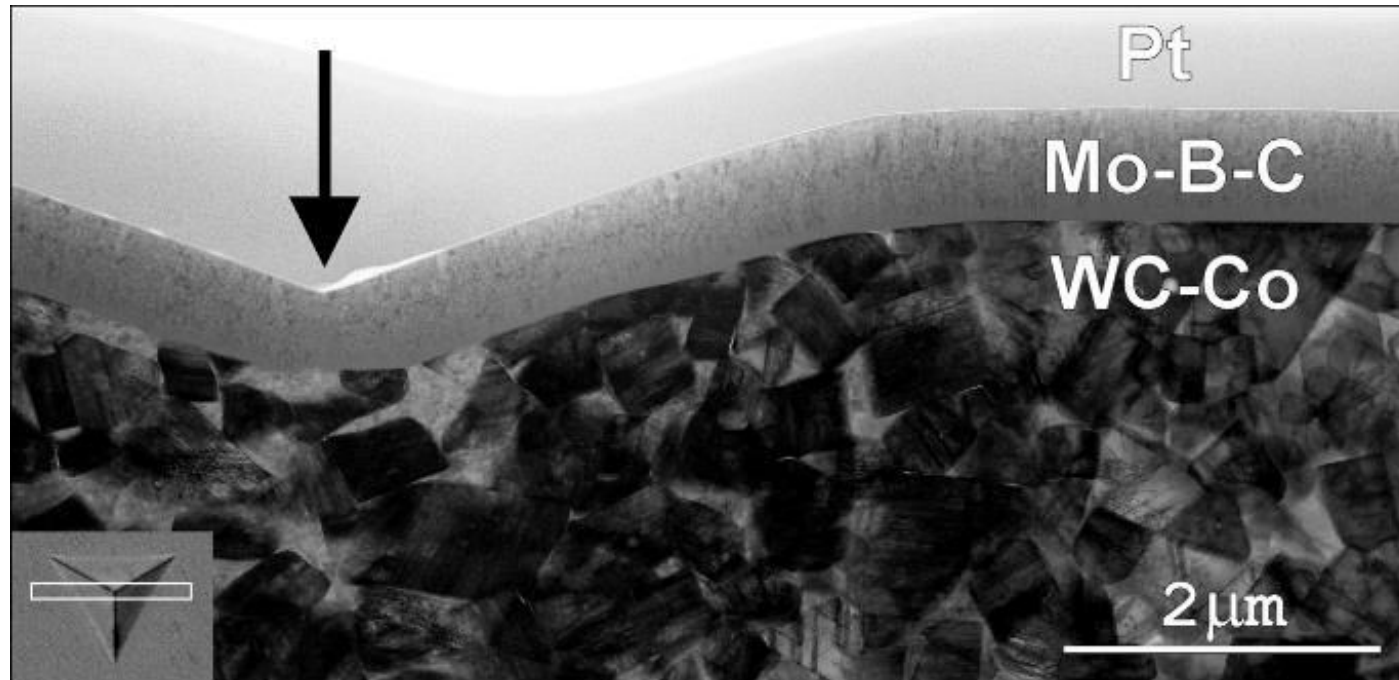
- Vrstvy Ti + C super tvrdé s nízkým koeficientem tření - biokompatibilní



TEM of the nanocomposite coating



- Vrstvy XBC (kde X = Ta, W, Mo) vysoká tvrdost a houževnatost



# Aplikace – tenké vrstvy

- Použití vrstev v různých průmyslových odvětvích



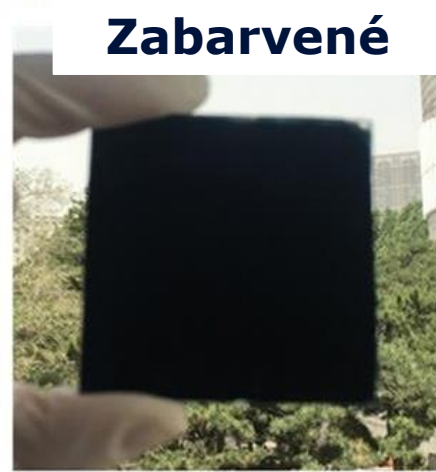
AlCrBN, AlTiNi, CrAlSiN, TiNi



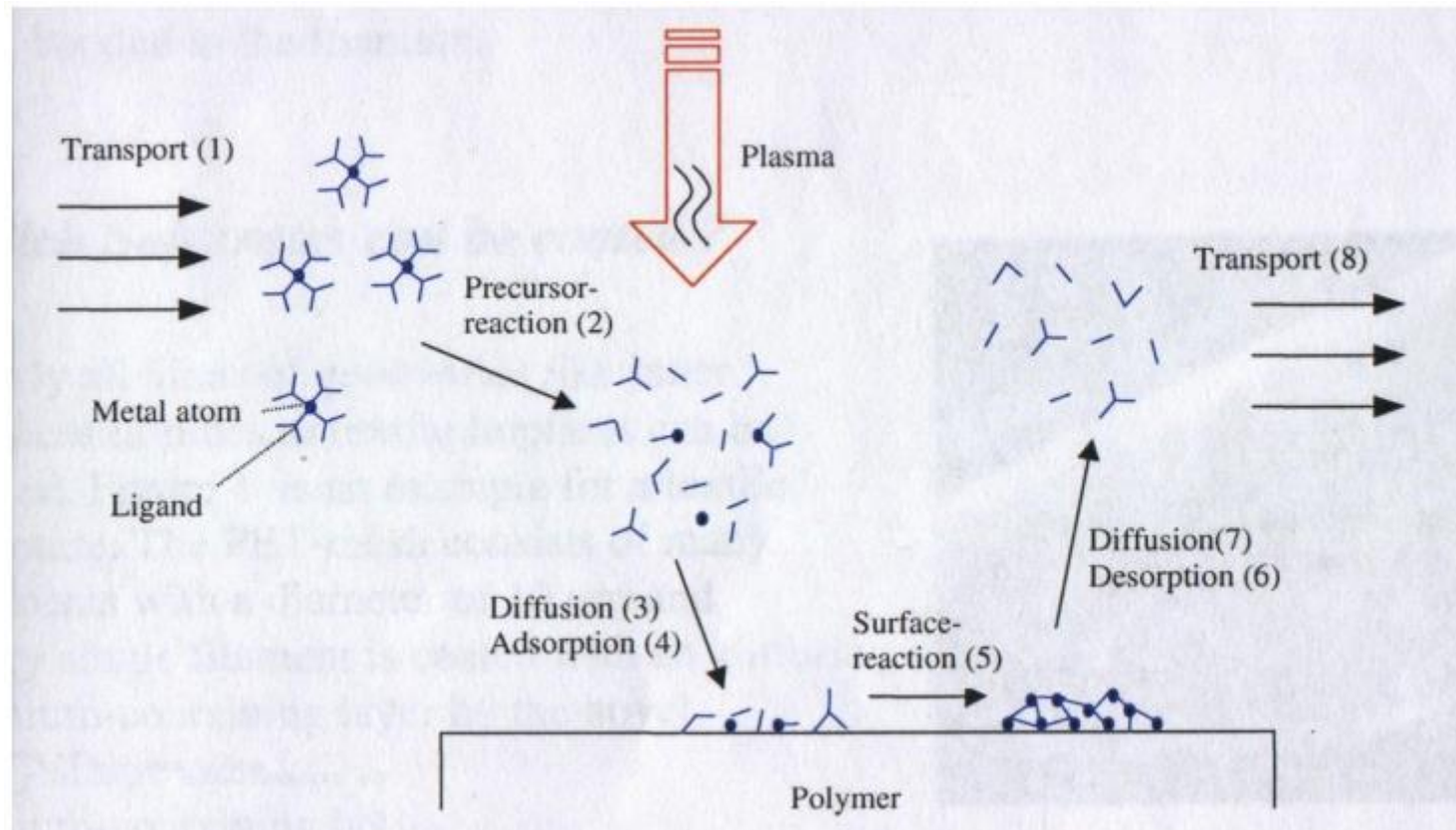
Bentley Continental GT 2018

# Tenké vrstvy - Smart windows

- 10 000x tenčí vrstva než tloušťka lidského vlasu
- Změna propustnosti vrstvy



# Plazmochemická depozice z plynné fáze



**TABLE 16.1. Selected Reaction Rate Constants for SiH<sub>4</sub> Discharges**

Number	Reaction	Rate Constant (cm <sup>3</sup> /s)	Source
1	$e + \text{SiH}_4 \rightarrow \text{SiH}_3 + \text{H} + e$	$1.5\text{E}-8 \exp(-10/T_e)$	a
2	$e + \text{SiH}_4 \rightarrow \text{SiH}_2 + 2\text{H} + e$	$1.8\text{E}-9 \exp(-10/T_e)$	a
3	$e + \text{SiH}_4 \rightarrow \text{SiH}_3^- + \text{H}$	$1.5\text{E}-11 \exp(-9/T_e)$	a
4	$e + \text{SiH}_4 \rightarrow \text{SiH}_2^- + \text{H}_2$	$9\text{E}-12 \exp(-9/T_e)$	a
5	$e + \text{SiH}_4 \rightarrow \text{SiH}_3^+ + \text{H} + 2e$	$3.3\text{E}-9 \exp(-12/T_e)$	a
6	$e + \text{SiH}_4 \rightarrow \text{SiH}_2^+ + \text{H}_2 + 2e$	$4.7\text{E}-9 \exp(-12/T_e)$	a
7	$\text{SiH}_4 + \text{H} \rightarrow \text{SiH}_3 + \text{H}_2$	$2.7\text{E}-12$	k
8	$\text{SiH}_4 + \text{SiH}_2 \rightarrow \text{Si}_2\text{H}_6^*$	$1\text{E}-11$	k
9	$\text{Si}_2\text{H}_6^* \rightarrow \text{Si}_2\text{H}_4 + \text{H}_2$	$5\text{E}6 / \text{s}$	k
10	$\text{Si}_2\text{H}_6^* + \text{SiH}_4 \rightarrow \text{Si}_2\text{H}_6 + \text{SiH}_4$	$1\text{E}-10$	k
11	$\text{SiH}_4 + \text{SiH}_3 \rightarrow \text{Si}_2\text{H}_5 + \text{H}_2$	$1.8\text{E}-15$	k
12	$\text{SiH}_3 + \text{H} \rightarrow \text{SiH}_2 + \text{H}_2$	$1\text{E}-10$	k
13	$\text{SiH}_3 + \text{SiH}_3 \rightarrow \text{SiH}_2 + \text{SiH}_4$	$7\text{E}-12$	k
14	$e + \text{SiH}_n^+ \rightarrow \text{SiH}_{n-1} + \text{H}$	$2.5\text{E}-7 T_e^{-1/2}$	a
15	$\text{SiH}_m^- + \text{SiH}_n^+ \rightarrow \text{SiH}_m + \text{SiH}_n$	$5\text{E}-7$	k

*Note.*  $T_e$  in volts and  $T \sim 500\text{--}700$  K for ions and neutrals. The notation E-8 means  $10^{-8}$ .

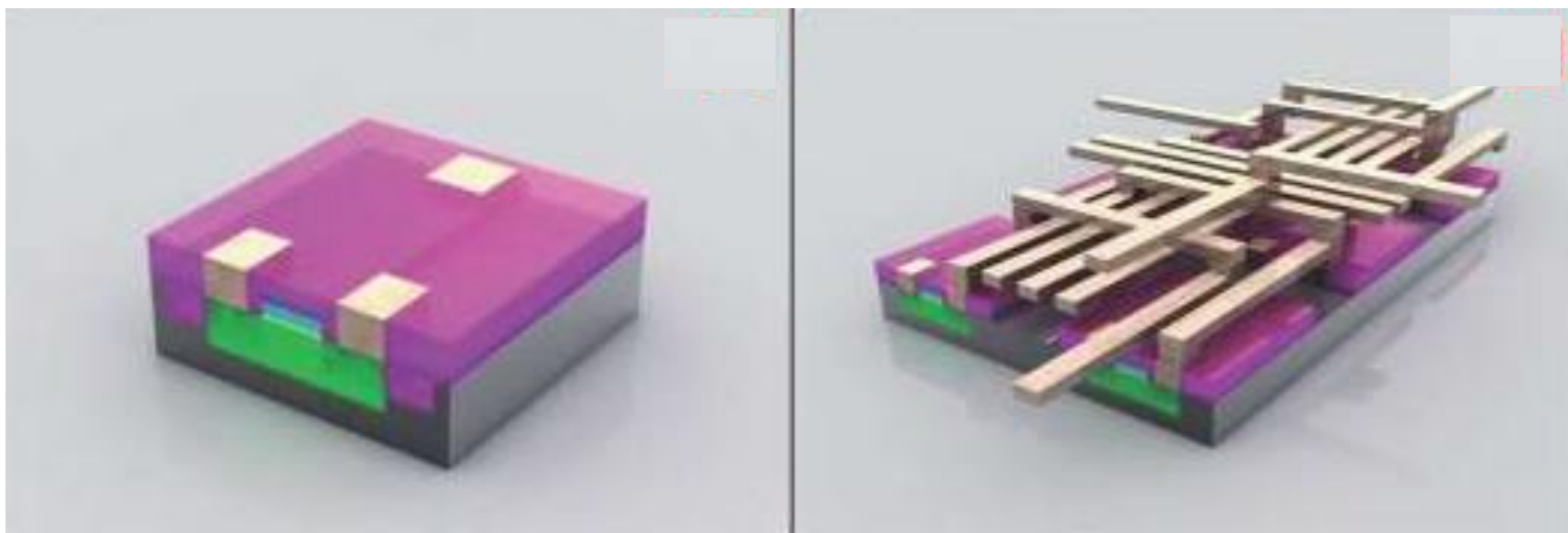
<sup>a</sup>Based on data in Kushner (1988).

<sup>k</sup>Kushner (1988).



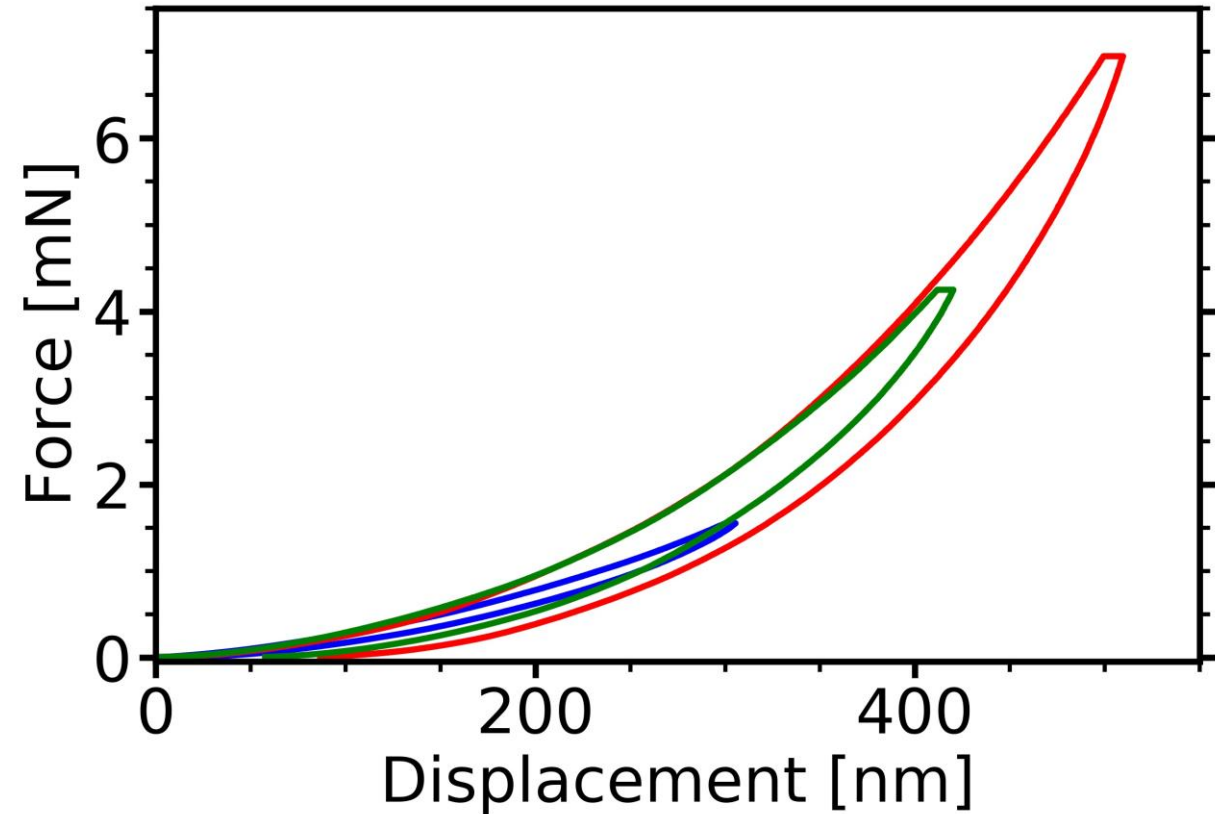
# Aplikace – tenké vrstvy

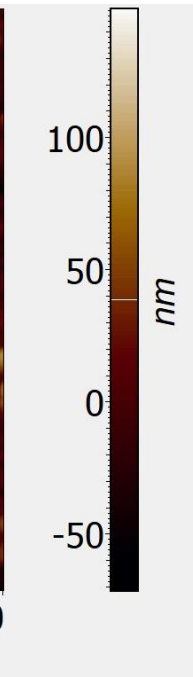
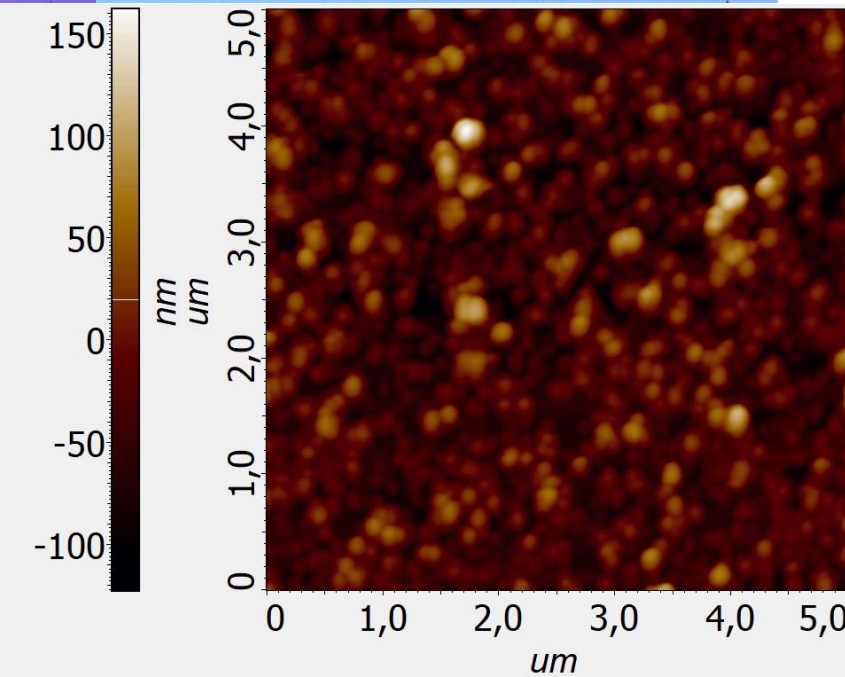
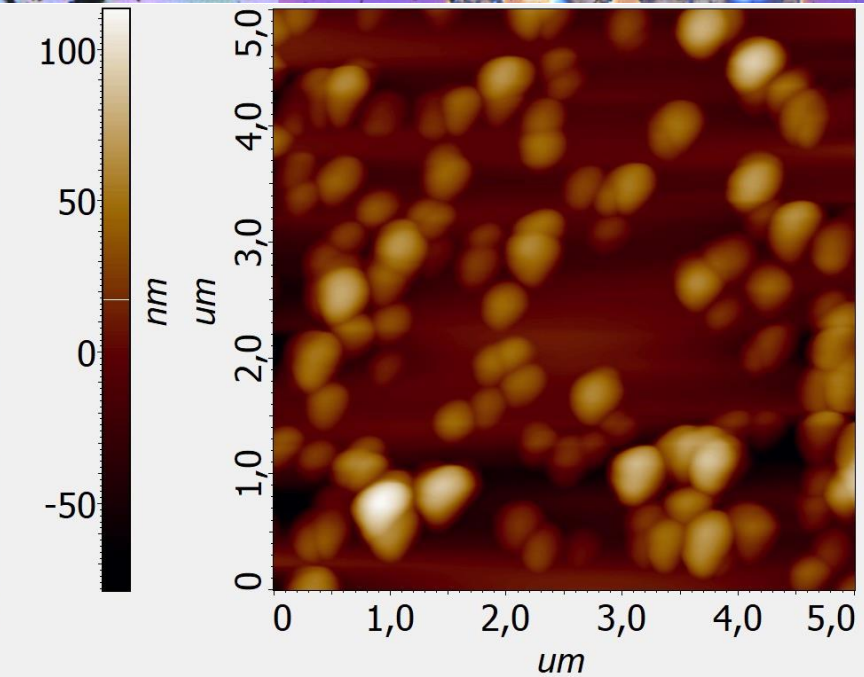
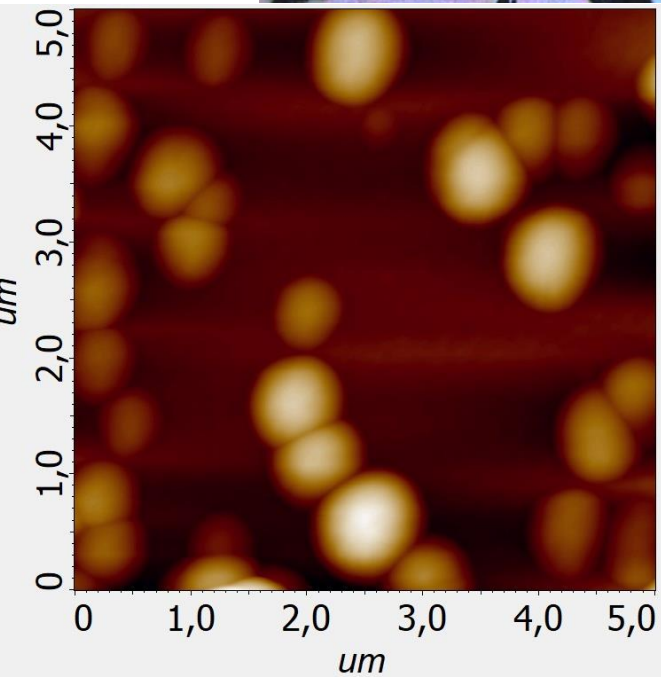
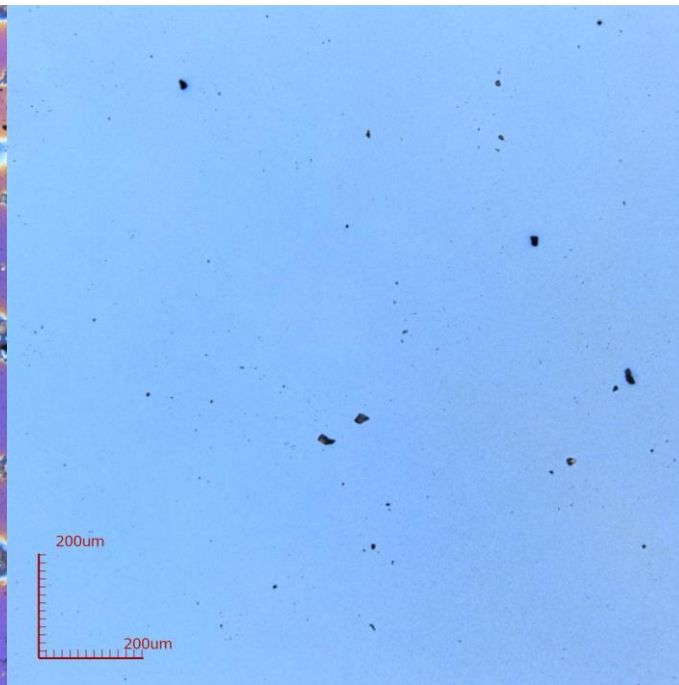
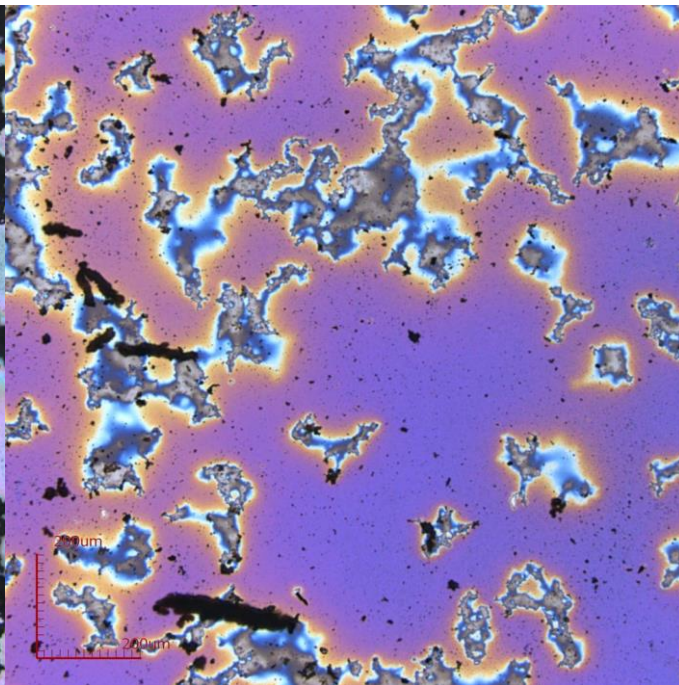
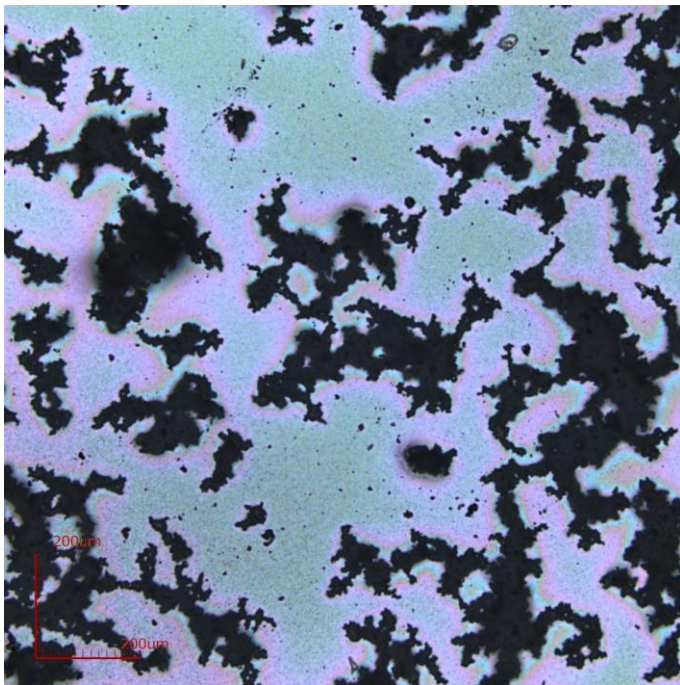
- Procesy v mikroelektronice při výrobě tranzistorů
- Součástky 4000x menší než lidský vlas



# Organosilikonové vrstvy

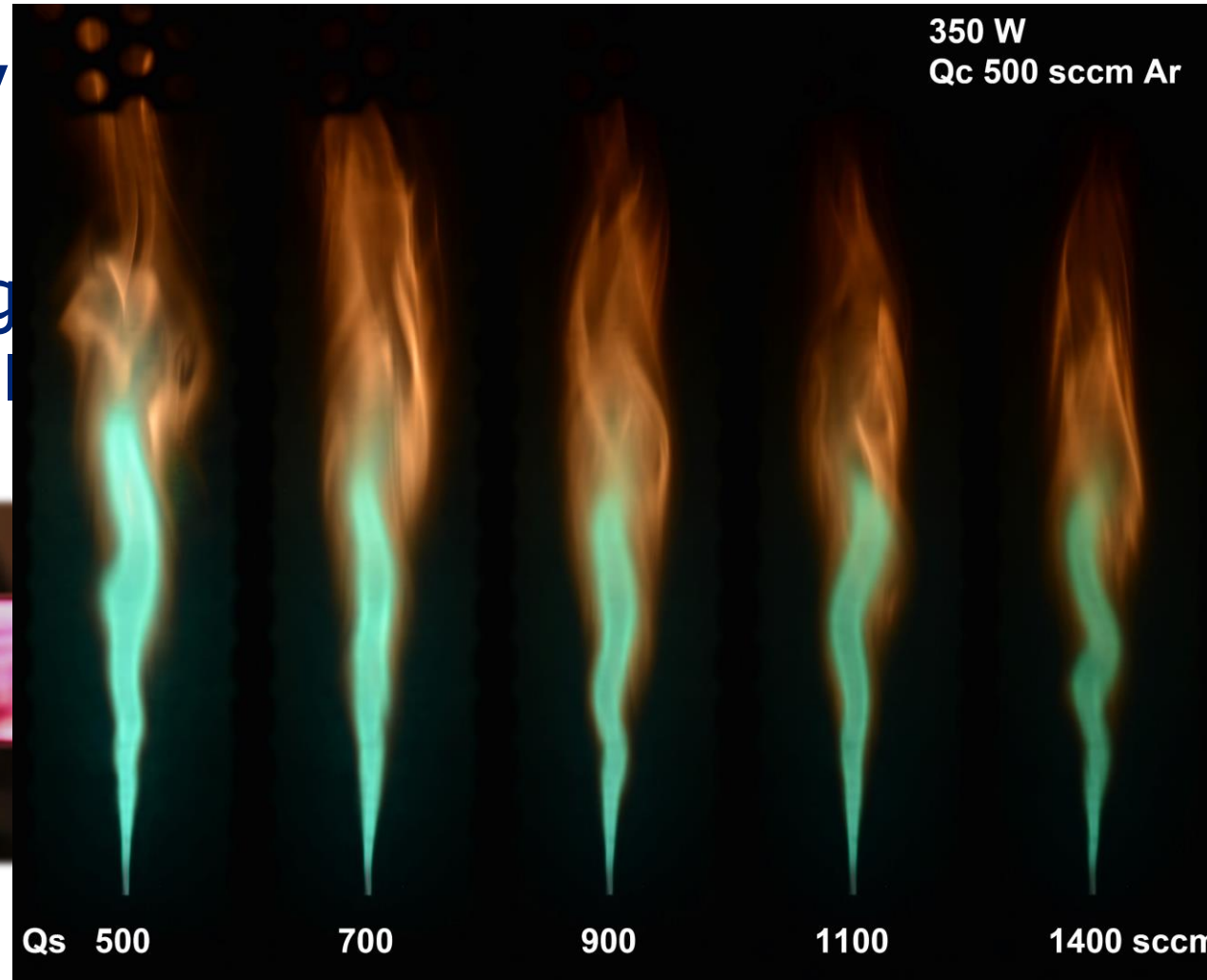
- $\text{SiO}_x$  skupiny
- Dusty plazma
- Superelastická





# Mikrov

- Depozice g
- Ferokapal



# Spolupráce s průmyslem

**SHM**

SUPER HARD MATERIALS

**PLATITE**

Advanced Coating Systems  
SWISS  QUALITY

 **TESCAN**  
PERFORMANCE IN NANOSPACE

**ThermoFisher**  
SCIENTIFIC

**VAKUUM**   
**SERVIS**

**PFEIFFER**  **VACUUM**

**MUNI CEPLANT**

# Nízkotlakové plazma – shrnutí ÚFE

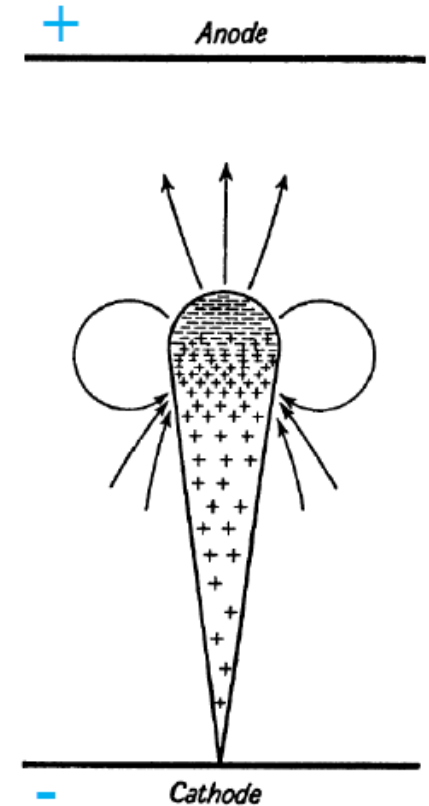
- Depozice tenkých vrstev
- Povrchové úpravy
- Rozsáhlá diagnostika plazmatu
- Detailní analýza deponovaných materiálů

# Obsah

- Plazma v přírodě
- Plazma – fyzikální i nefyzikální definice
- Nízkotlakové plazma
- Atmosferické plazma

# Atmosférický výboj a streamer

- (Ne)rozdílný princip než u nízkotlakých výbojů
- Rychlost přenosu náboje vyšší než jeho pohyblivost
- Dlouho trvající výboj -> oblouk

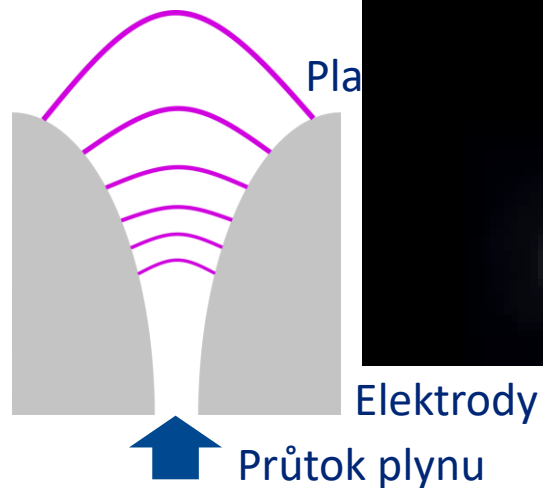




# Průmyslový plazmový zdroj na bázi indukčního plazmového žháráku

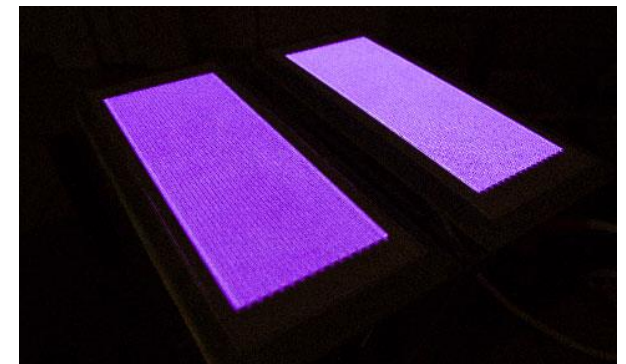
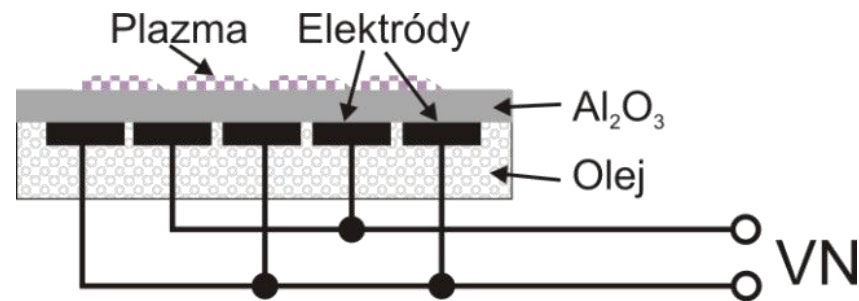
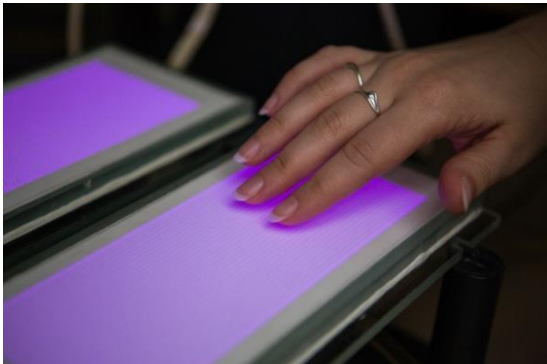
- Ne
- Úp
- v
- Vy

3D objektů



# Originál: Difuzní koplánární povrchový bariérový výboj (DCSBD)

- Zdroj vysoce nerovnovážného plazmatu
- Tenká vrstva plazmatu ( $\sim 0.3$  mm)
- Atmosférický tlak
- Generování v různých plynech (vzduch, kyslík, dusík, vodní páry,...)

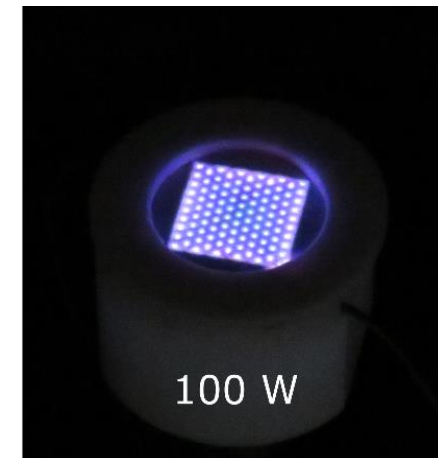
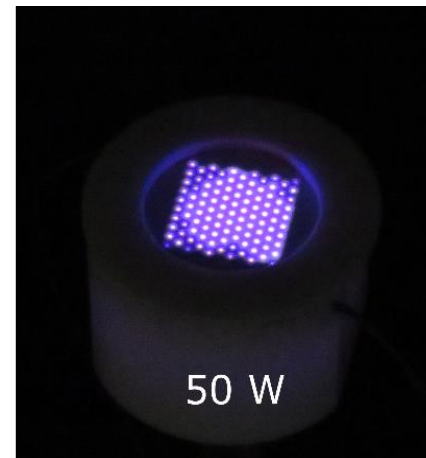
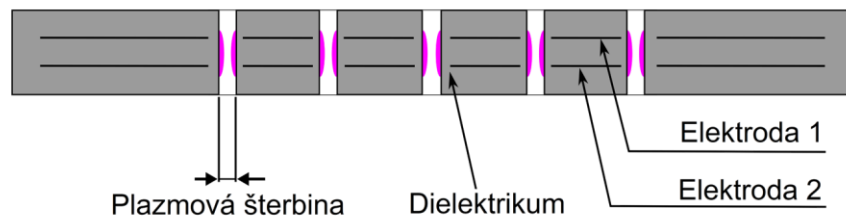


# DCSBD v různých atmosférách



# Speciální dutinový dielektrický bariérový výboj (MSDBD)

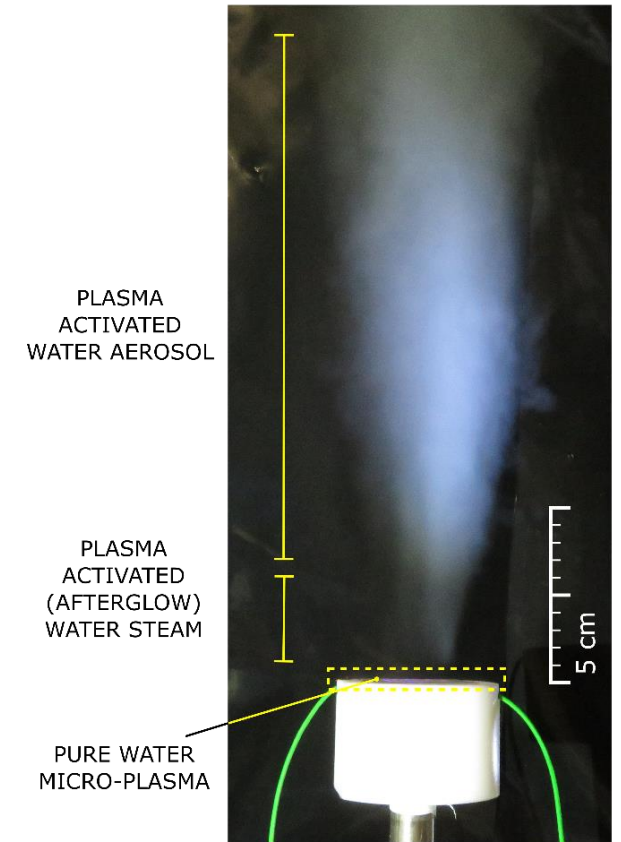
- Nerovnovážné plazma
- Možnost vyfukování plazmatu prouděním plynu (argon, vzduch, dusík, kyslík,...)
- Atmosférický tlak



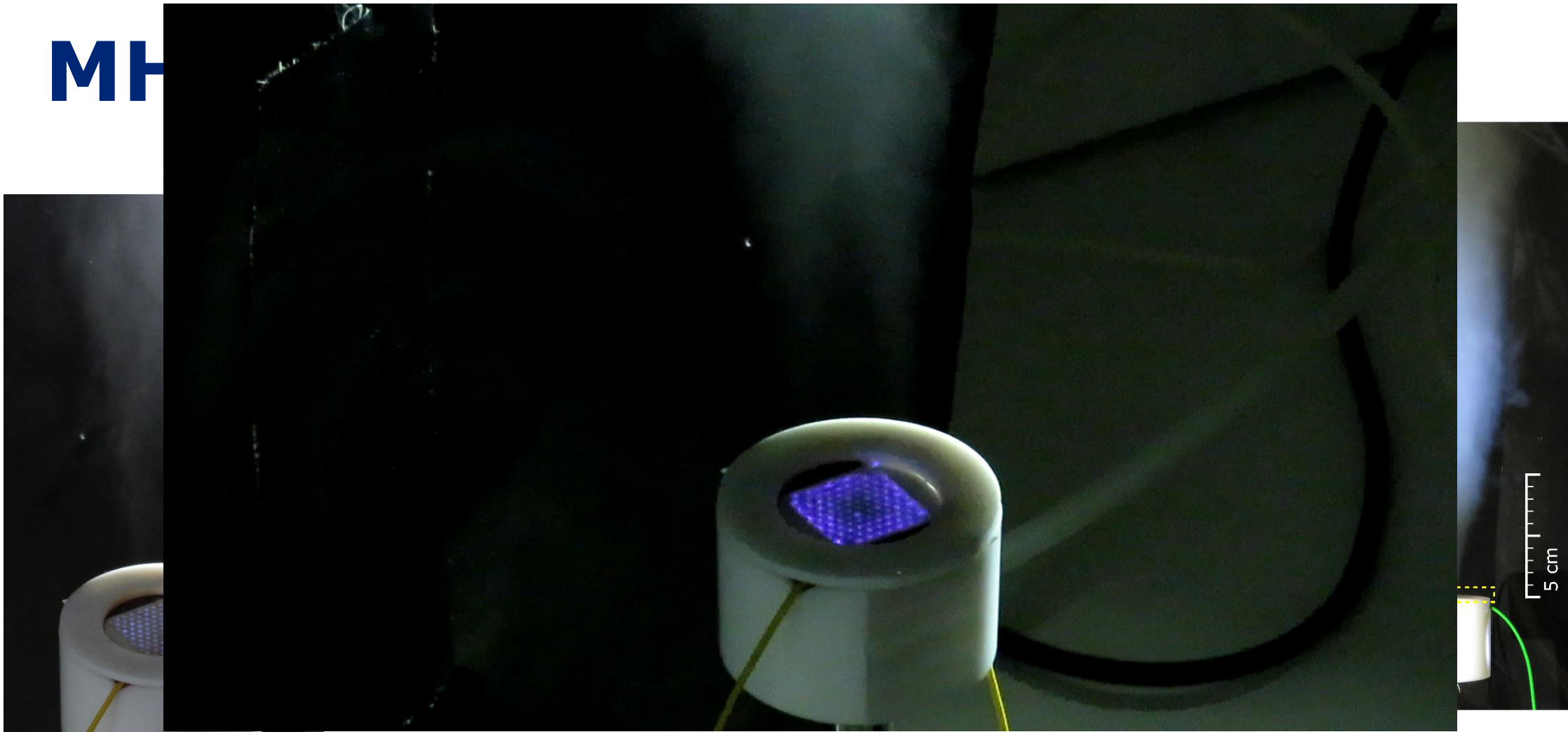
# MHDBD – vodní pára



- Atmosférický tlak
- Generace **Reaktivních kyslíkových skupin** ( $\text{H}_2\text{O}_2, \text{OH}, \text{O}, \text{O}_3$ )
- Plazmová aktivace vodní páry
- Opracování pomocí **aktivované páry**
- Možnost využití i pro **termálně senzitivní materiály** a **biomateriály**



MH



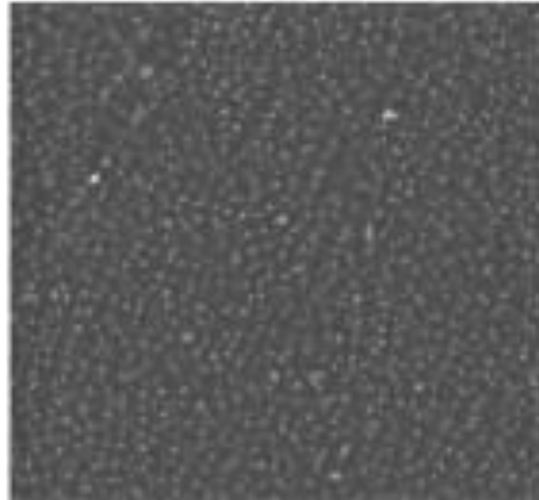
MUNI *CEPLANT*

# Plazmové leptání povrchů

10 %

5 %

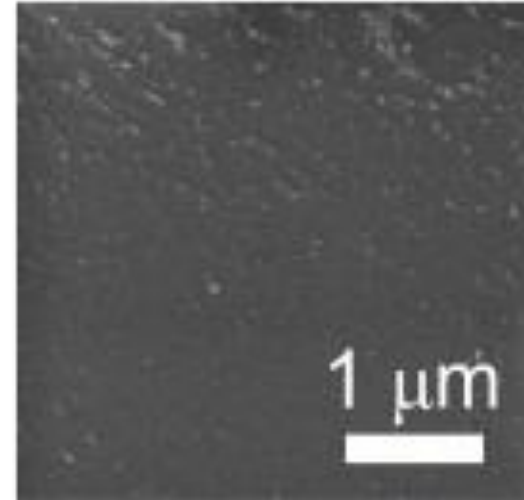
0 %



reference

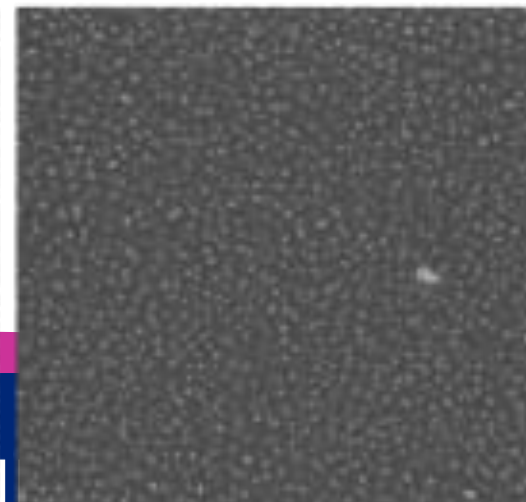
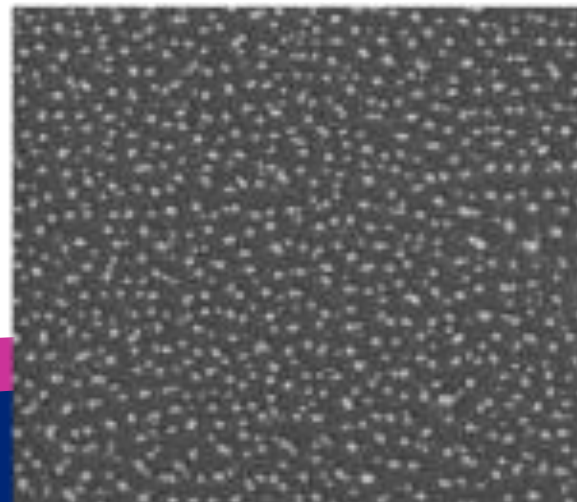
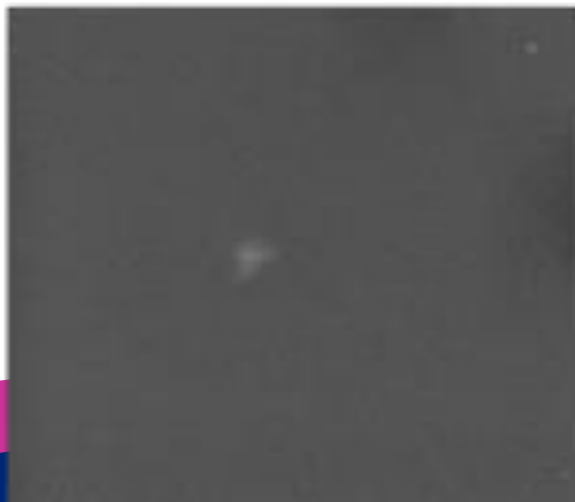


100 %

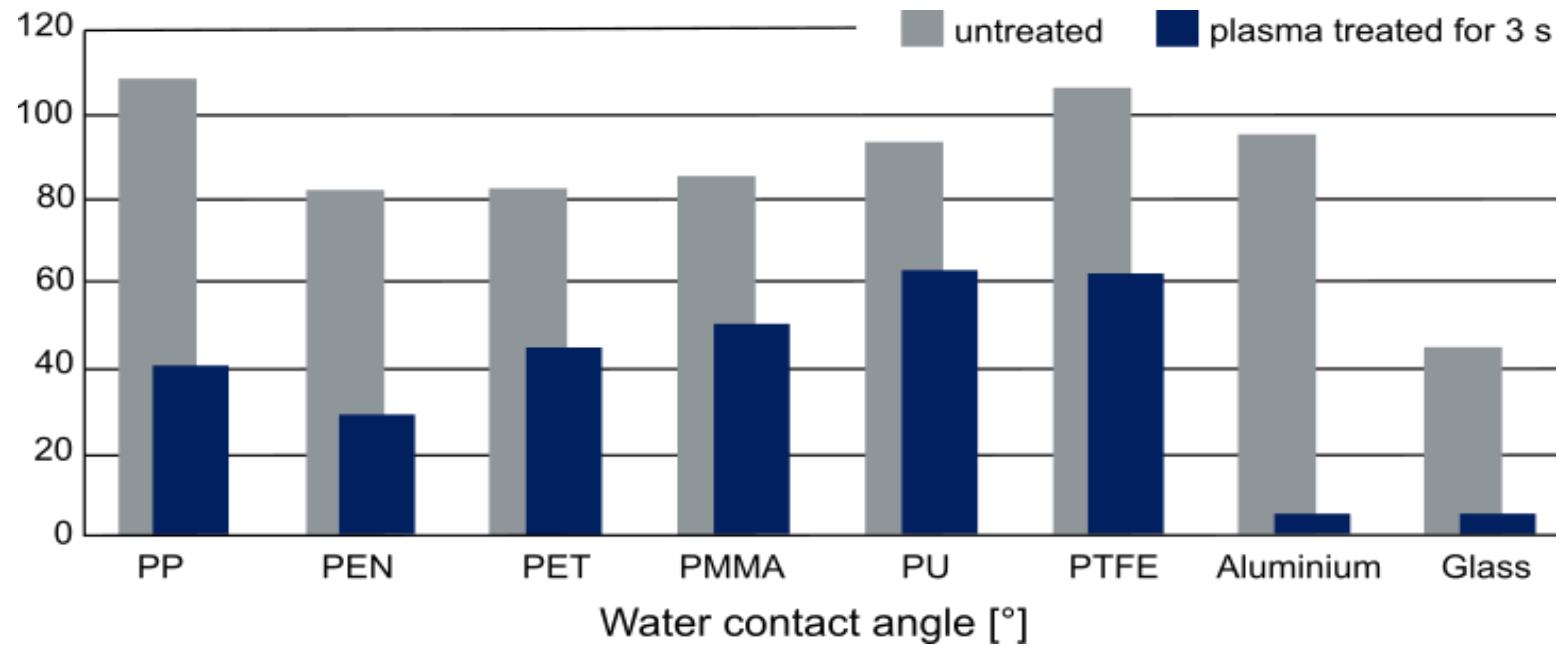


20 %

PET foil



# Plazmová modifikace - vzduch





# DCSBD testováno na FMFI UK v Bratislavě na skle



# From CEPLANT to industry

ROPLASS s.r.o. is a spin-off company  
of Masaryk University, Czech Republic

**ROPLASS** robust  
plasma  
systems



RPS 400 for R2R



RPS 400



RPS 40



RPS 50+

**MUNI CEPLANT**

# Atmosférické plazma – shrnutí ÚFE

- Diagnostika plazmatu za atmosférického tlaku
- Plazmová modifikace povrchů
  - Plazmochemicky / Fyzikálně
- Využití atmosférických výbojů v praxi

# Co si odnést?

- **Fyzika plazmatu** je komplexní disciplína, která obsahuje ohromné množství komplikované teorie stejně jako poměrně intuitivní experimentální fyziky
- **Ústav fyzikální elektroniky** je velmi aktivní v národních i mezinárodních projektech na kterých se podílí ne jen dlouho-letí profesionálové, ale také studenti všech stádií studia (Bc., Mgr., Ph.D.)
  - nezávisle na oboru
- **Rádi přivítáme nové mladé kolegy!**