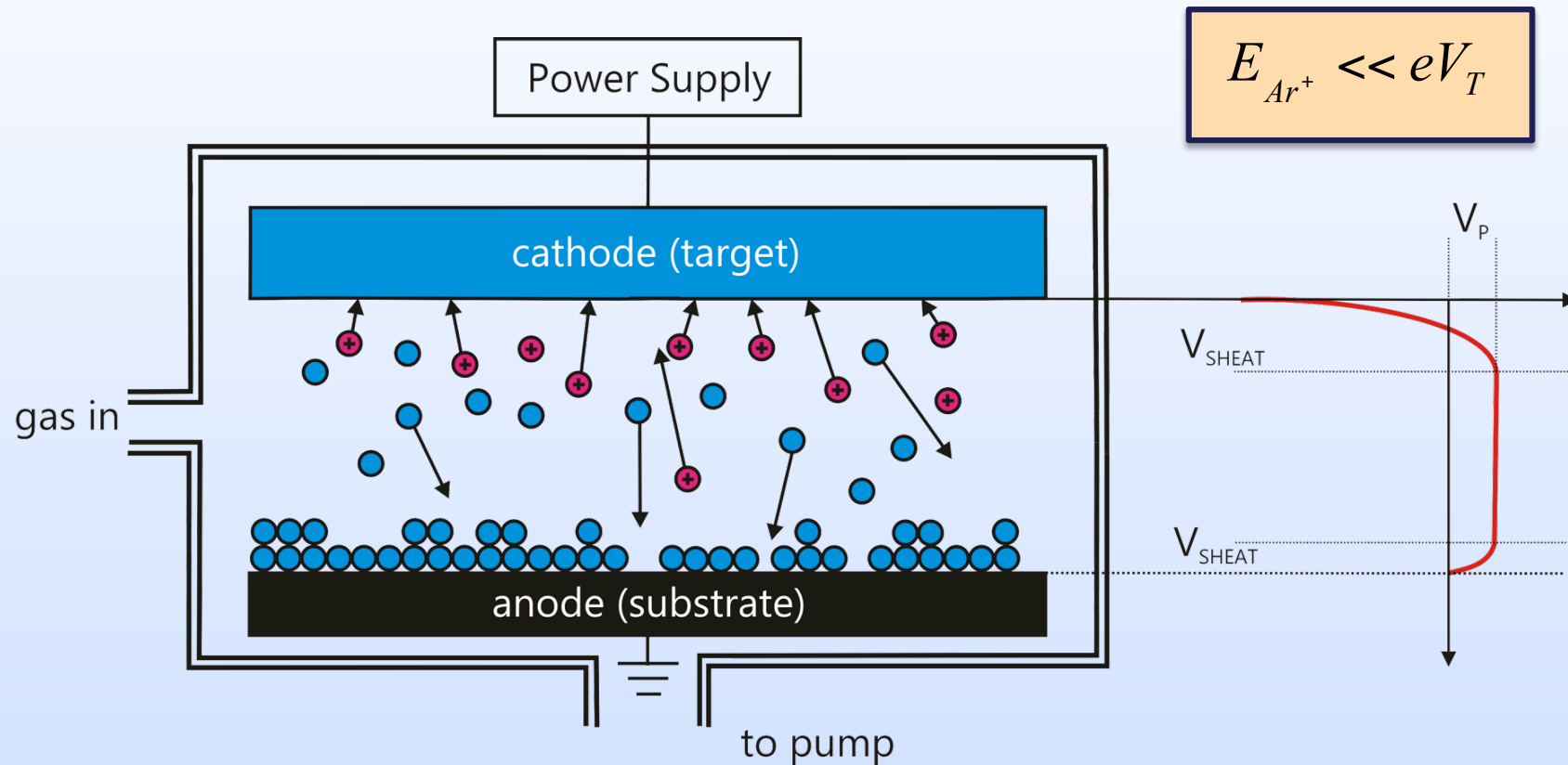


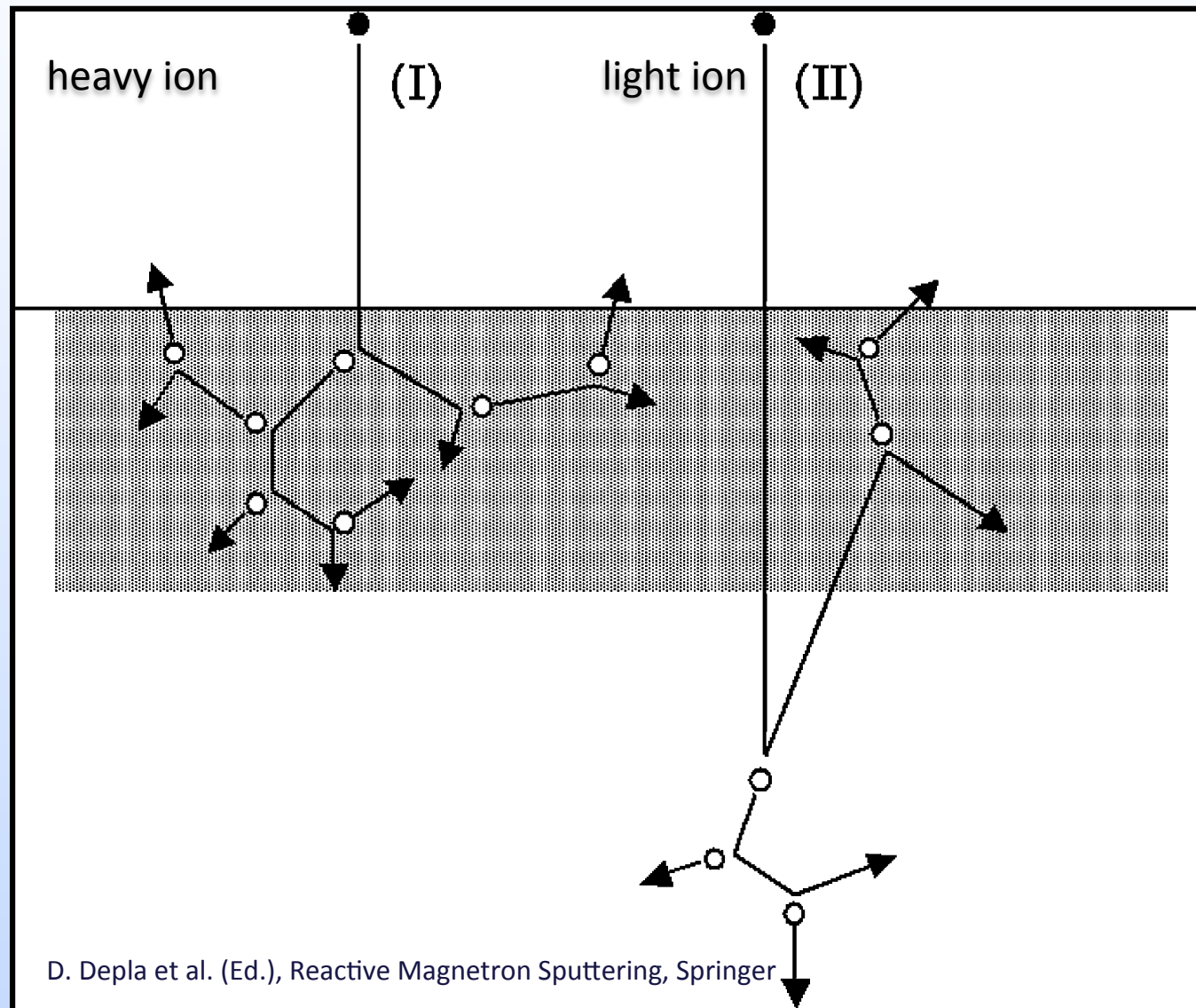
Thin Film Deposition

Sputtering in Gasentladung

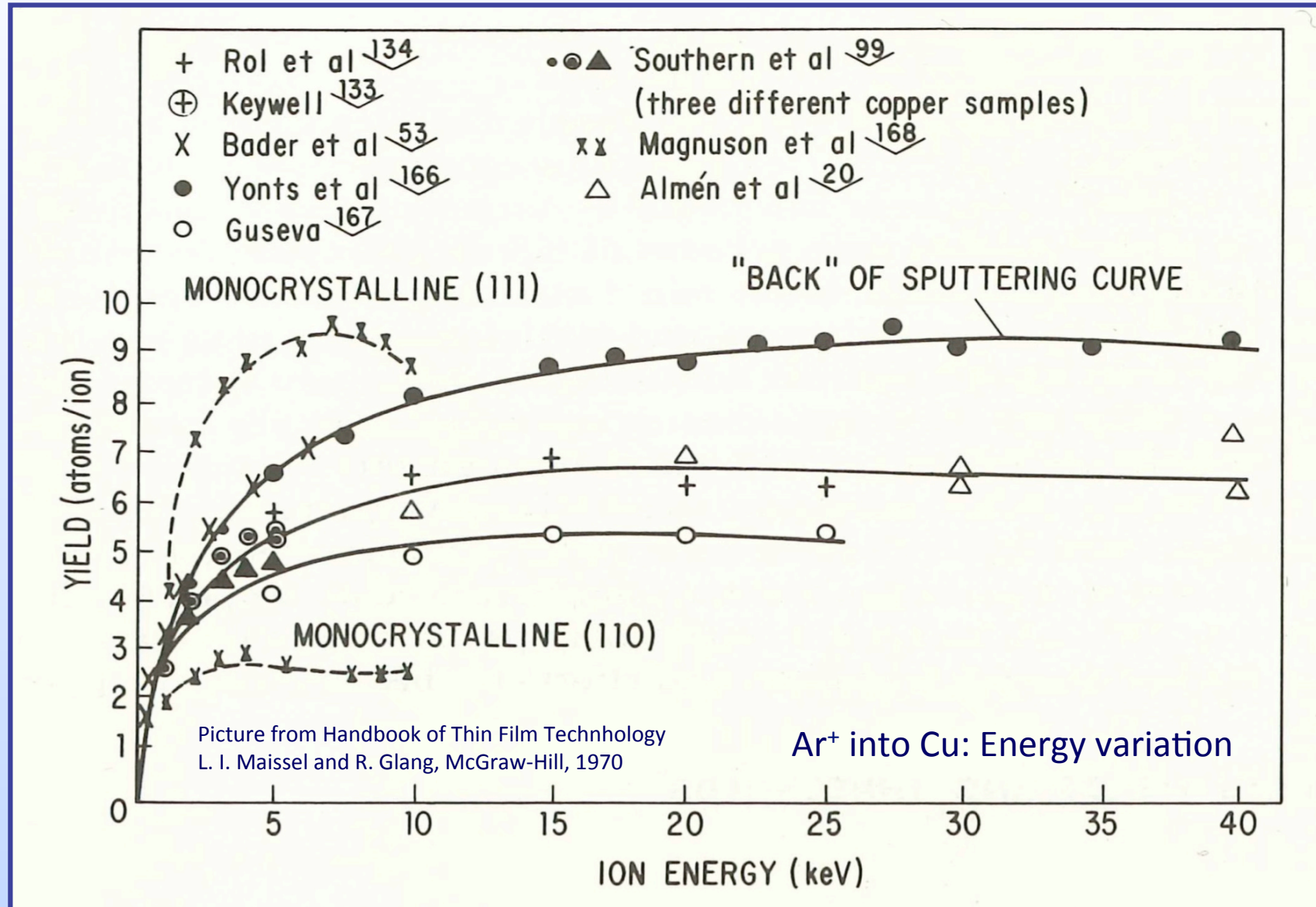


1. Erzeugung von Ionen in einem Plasma
2. Beschleunigung der Ionen im elektrischen Feld
3. Aufprall der Ionen auf abzuscheidendes Schichtmaterial (Target) => Sputtering
4. Herausgeschlagene (gesputterte) Teilchen fliegen vom Target zum Substrat
5. Target-Atome schlagen sich als feine „Stäube“ auf Substrat nieder

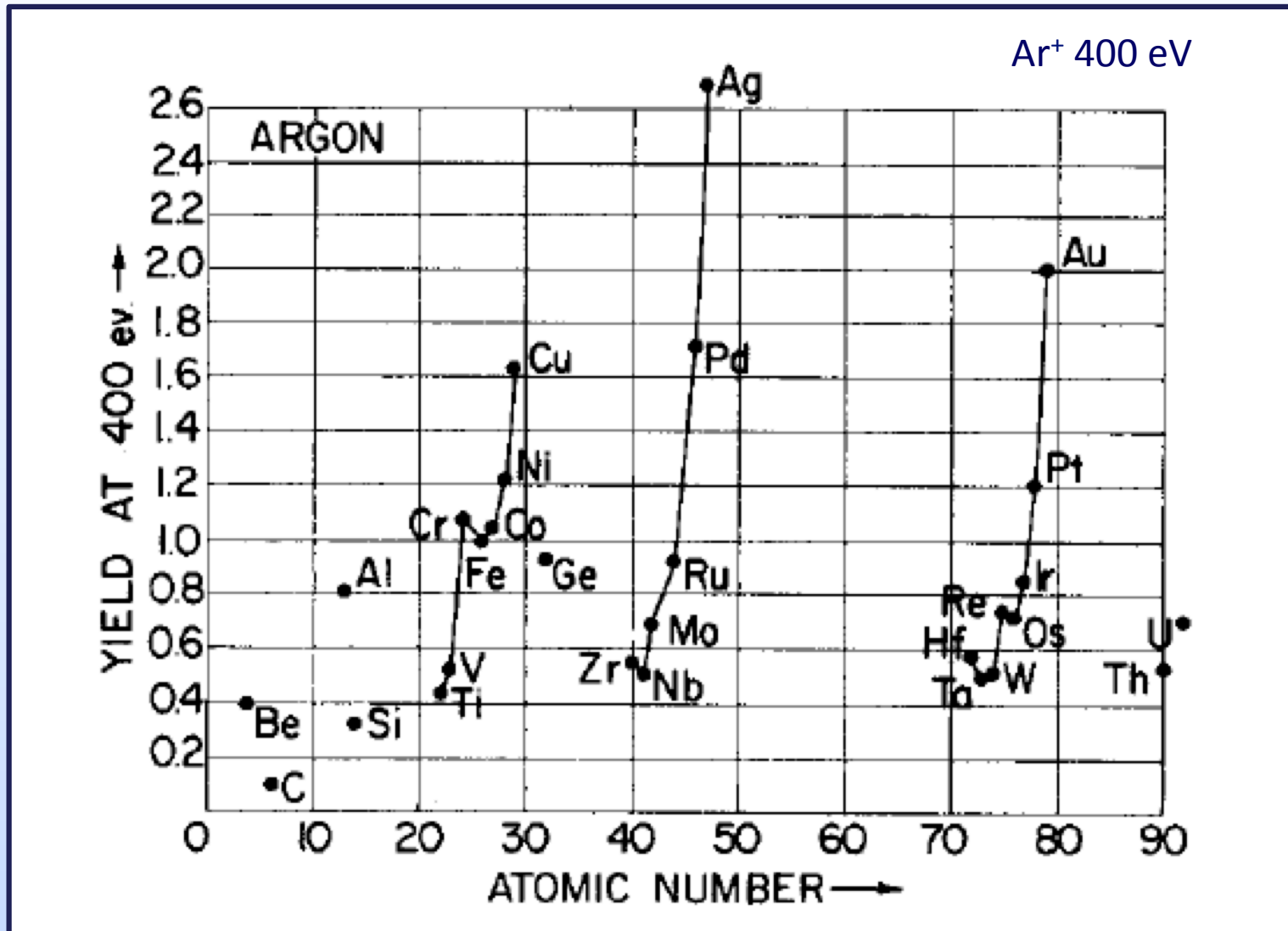
Sputtering process



Sputtering yield

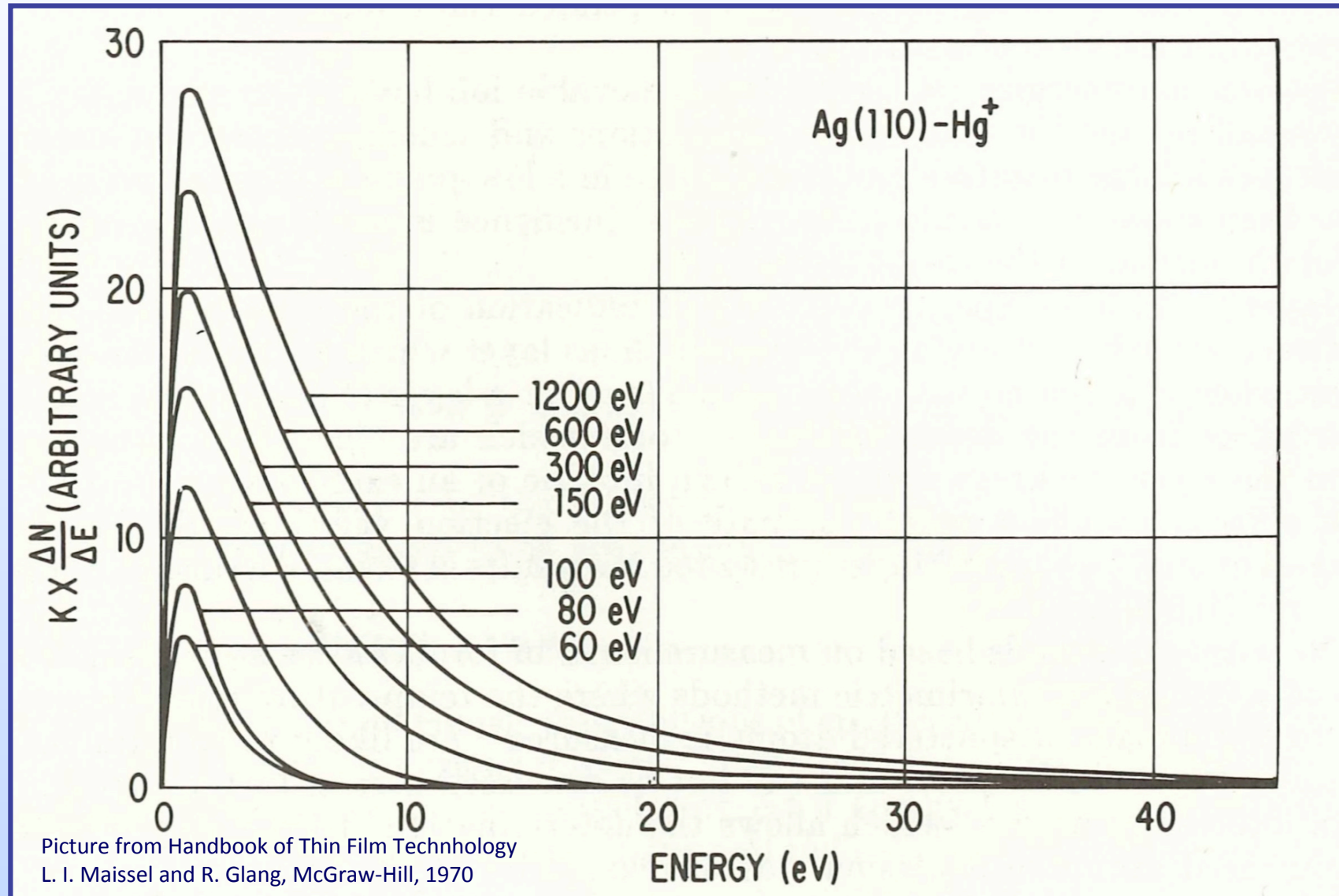


Sputtering yield

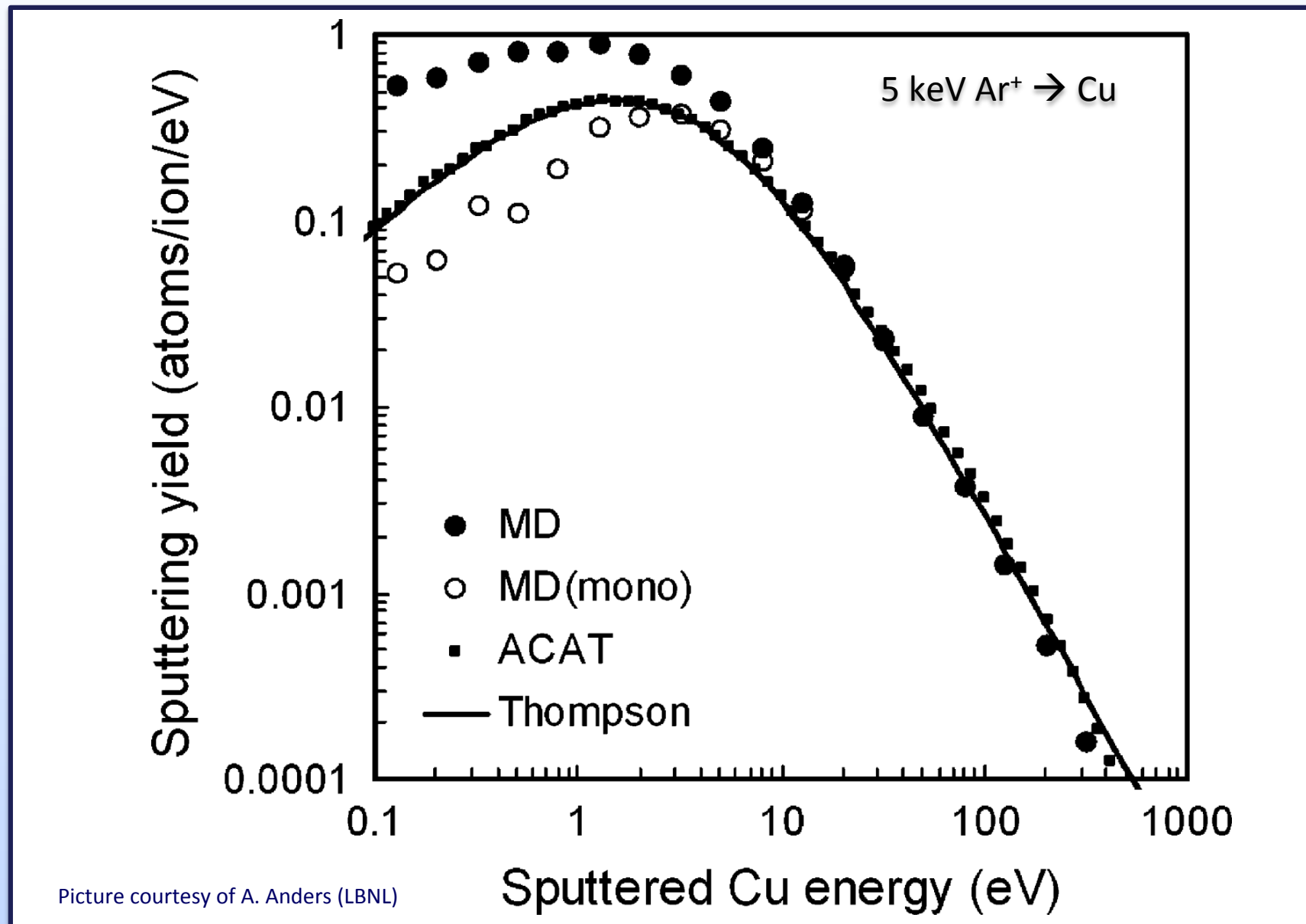


N. Laegried and G. K. Wehner, J. Appl. Phys. 32 (365) 1961.

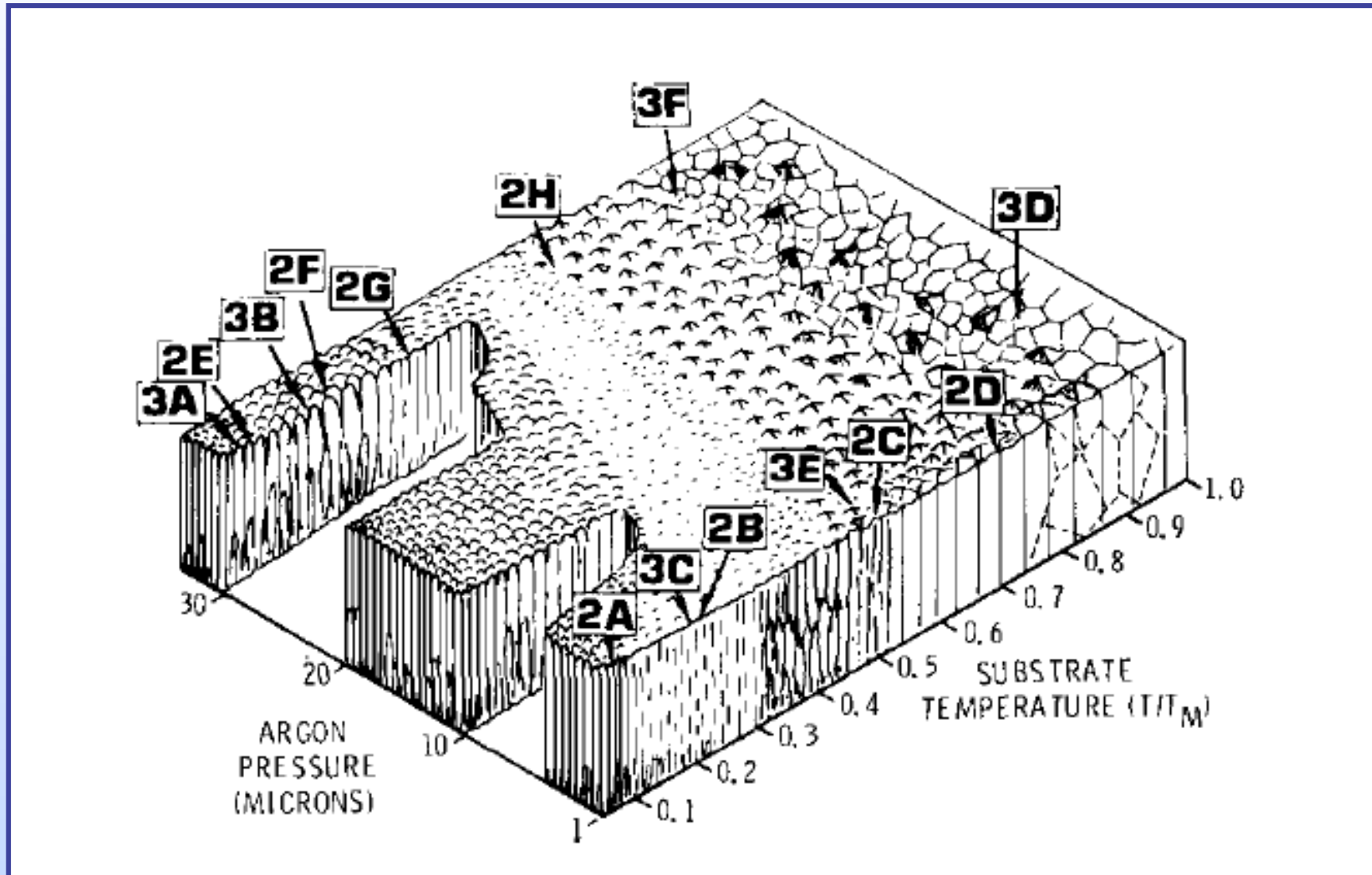
Energie der gesputterten Teilchen: Thompson Distribution



Energie der gesputterten Teilchen: Thompson Distribution

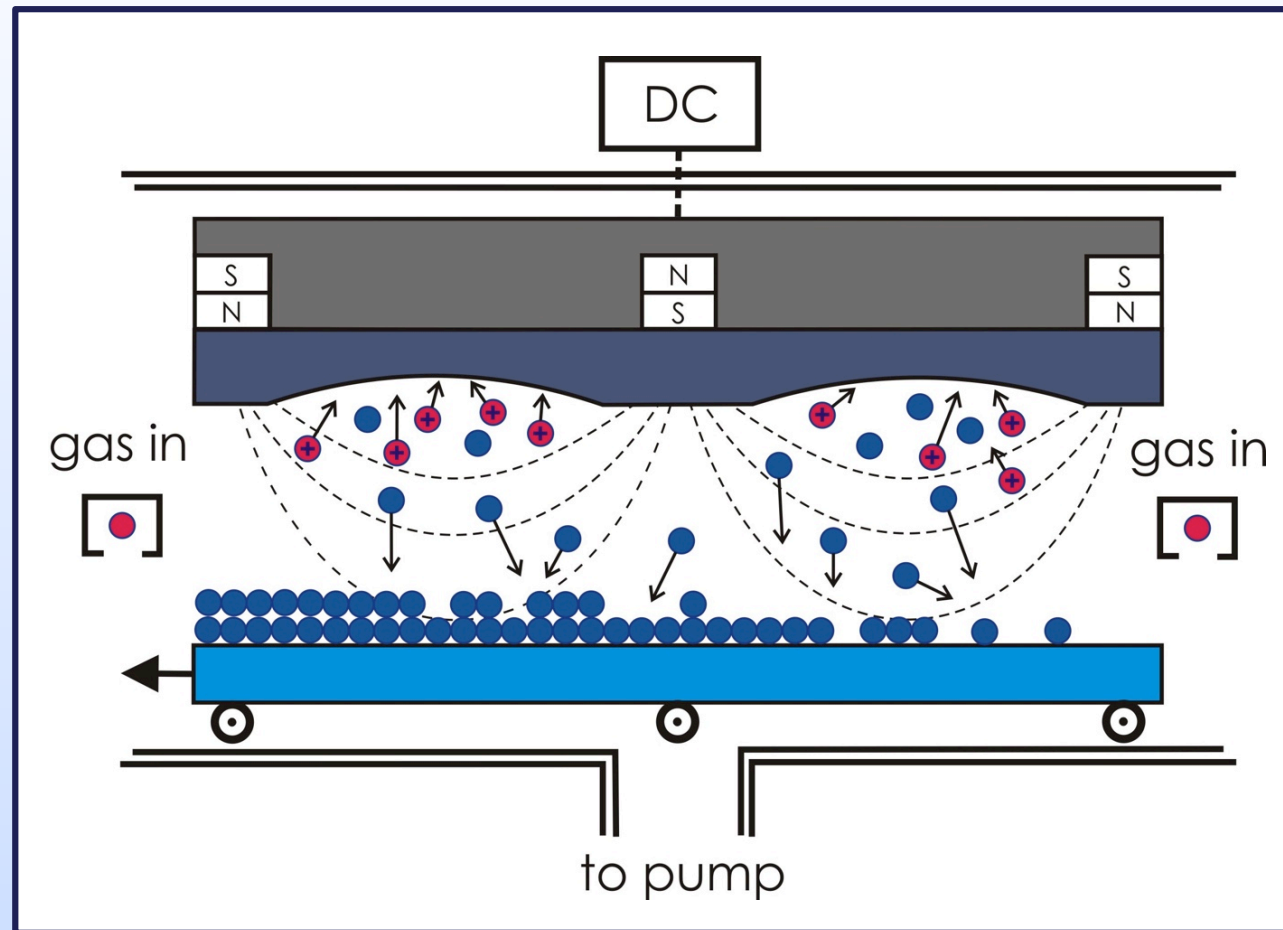


Thornton's structure zone diagram

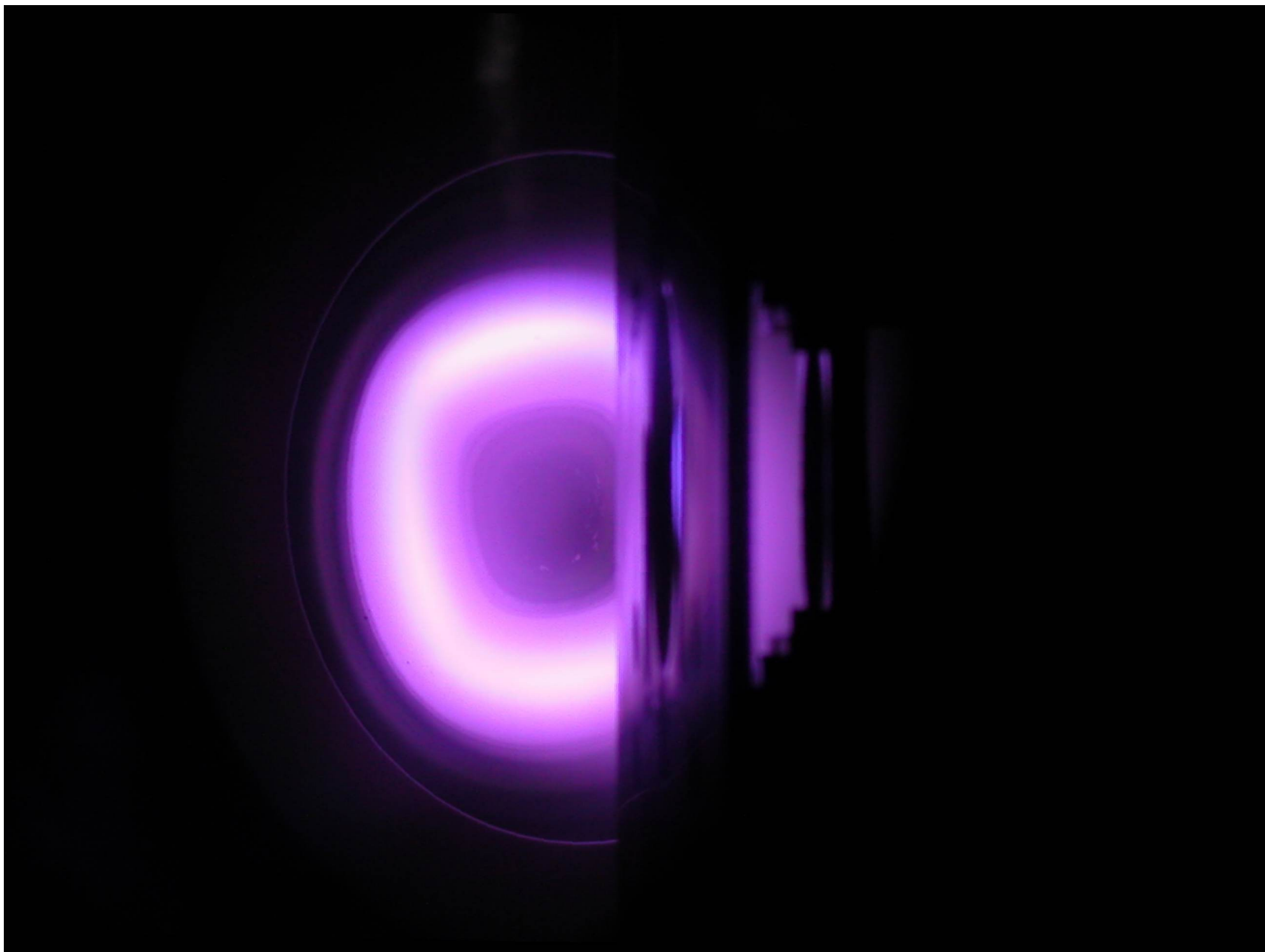


J.A. Thornton, Journal of Vacuum Science and Technology 11 (1974) 666.

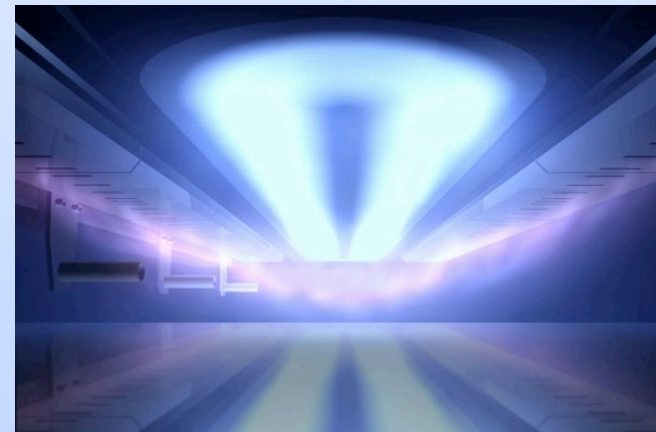
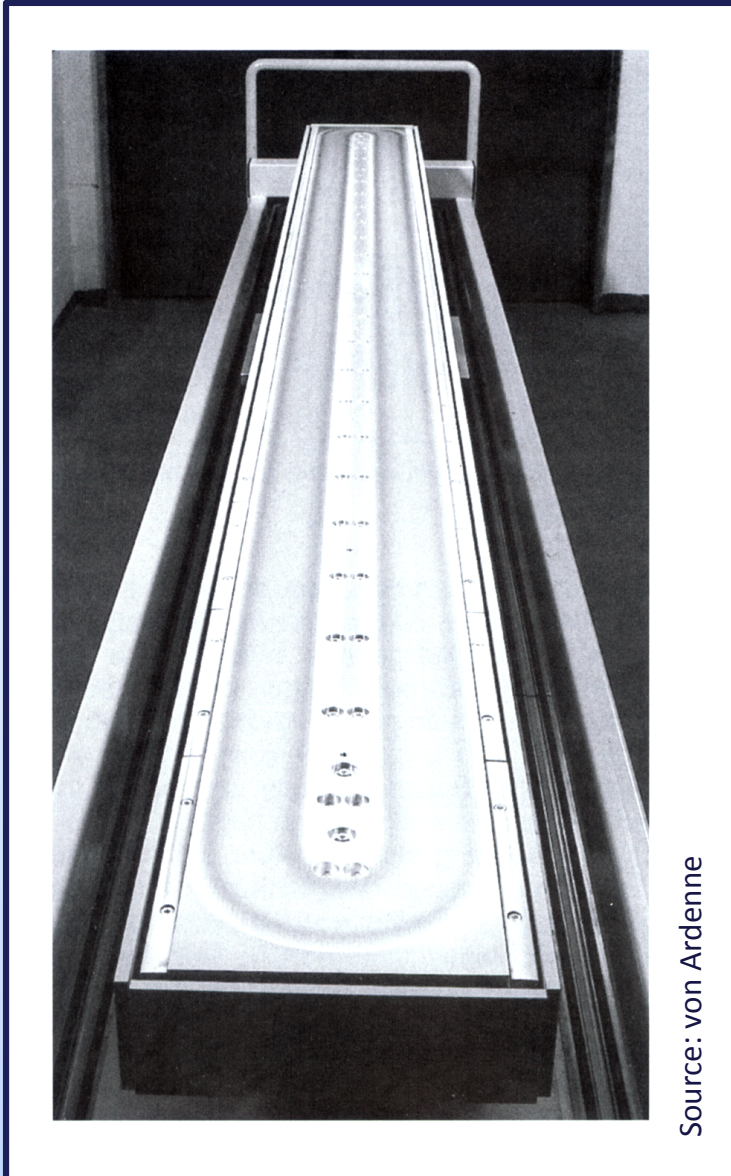
Magnetron sputtering



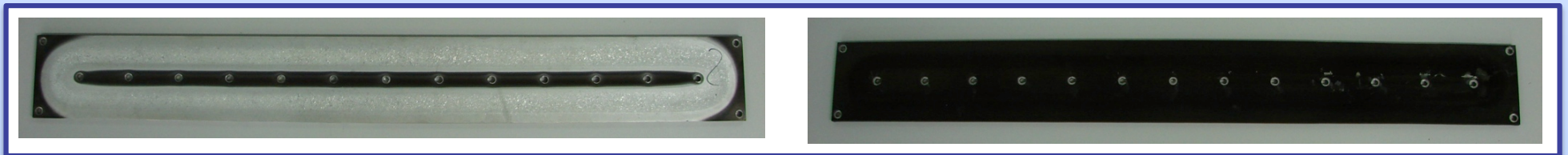
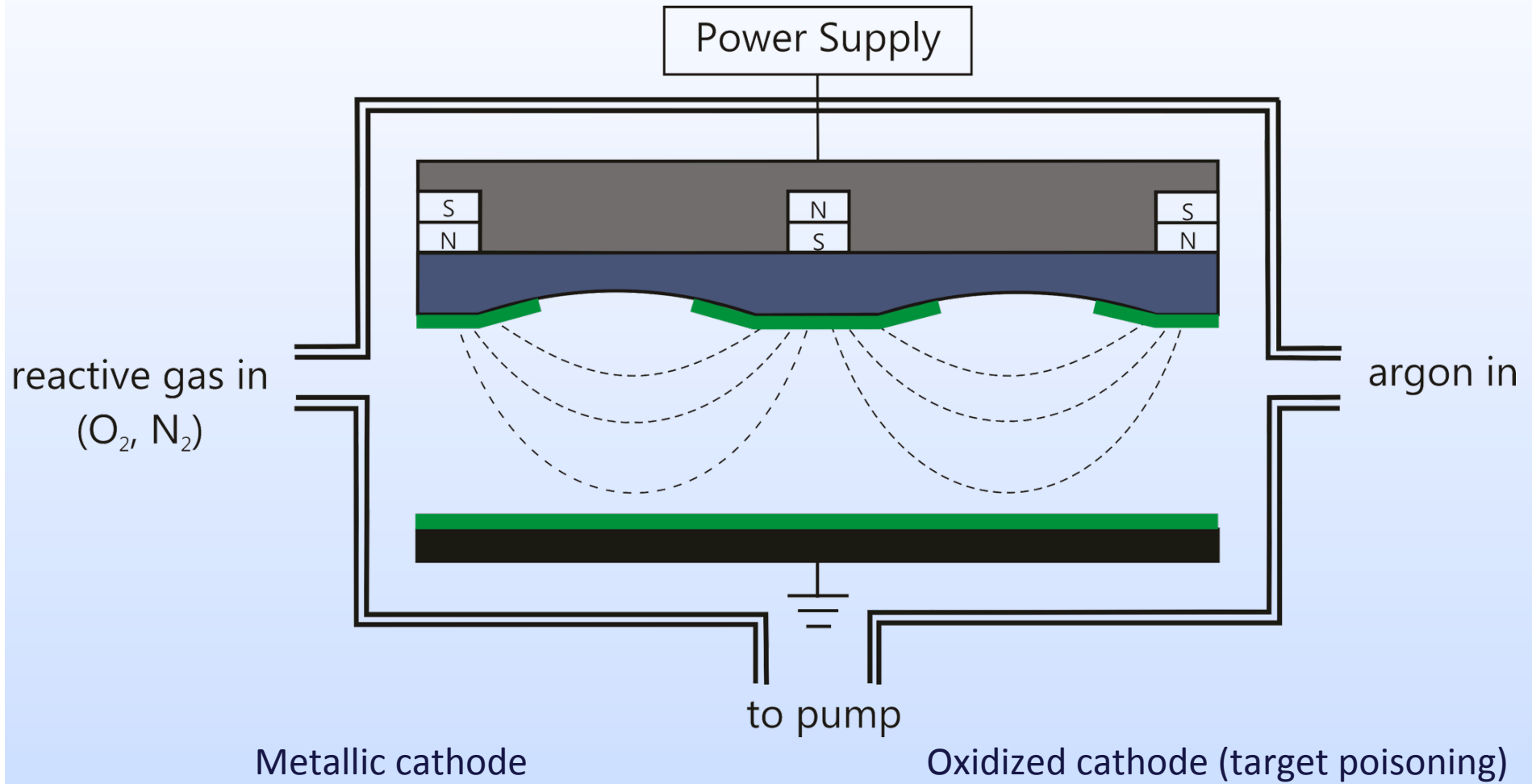
- längere Verweildauer
- mehr Stöße zwischen Elektronen und Prozessgas => höhere Ionisierungsgrad
- Abscheidungsrate steigt bis zu einer Größenordnung



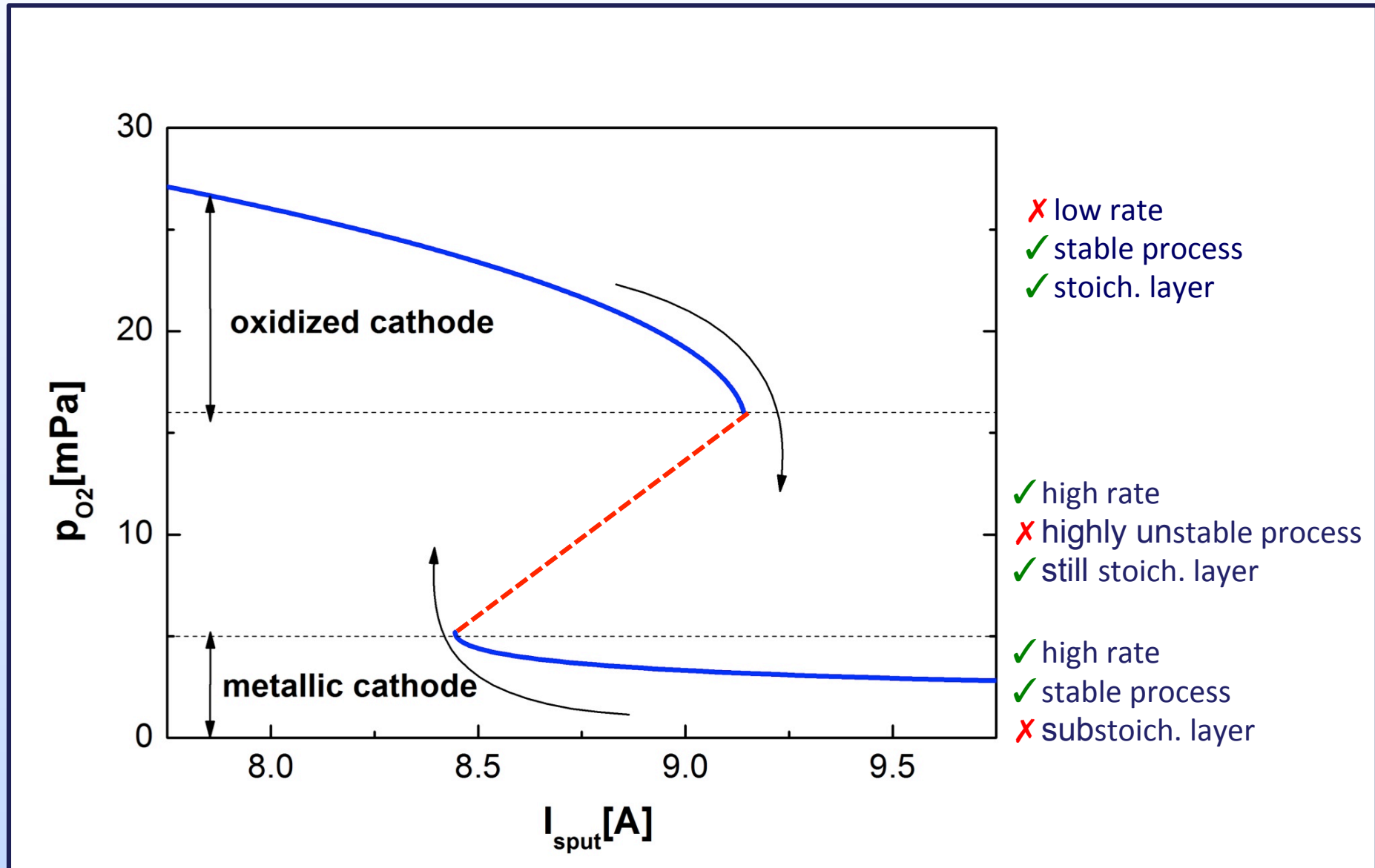
Large-Area Magnetrons



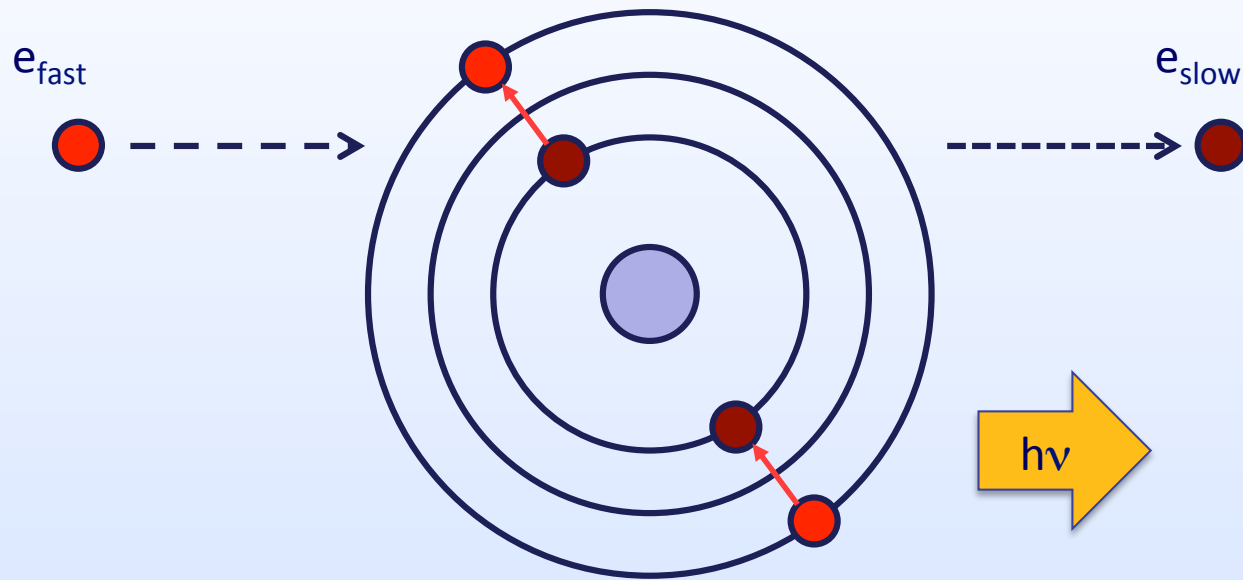
Reactive Sputtering



Hysteresis



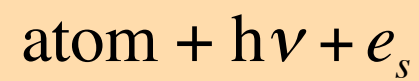
Plasma Emission Spectroscopy



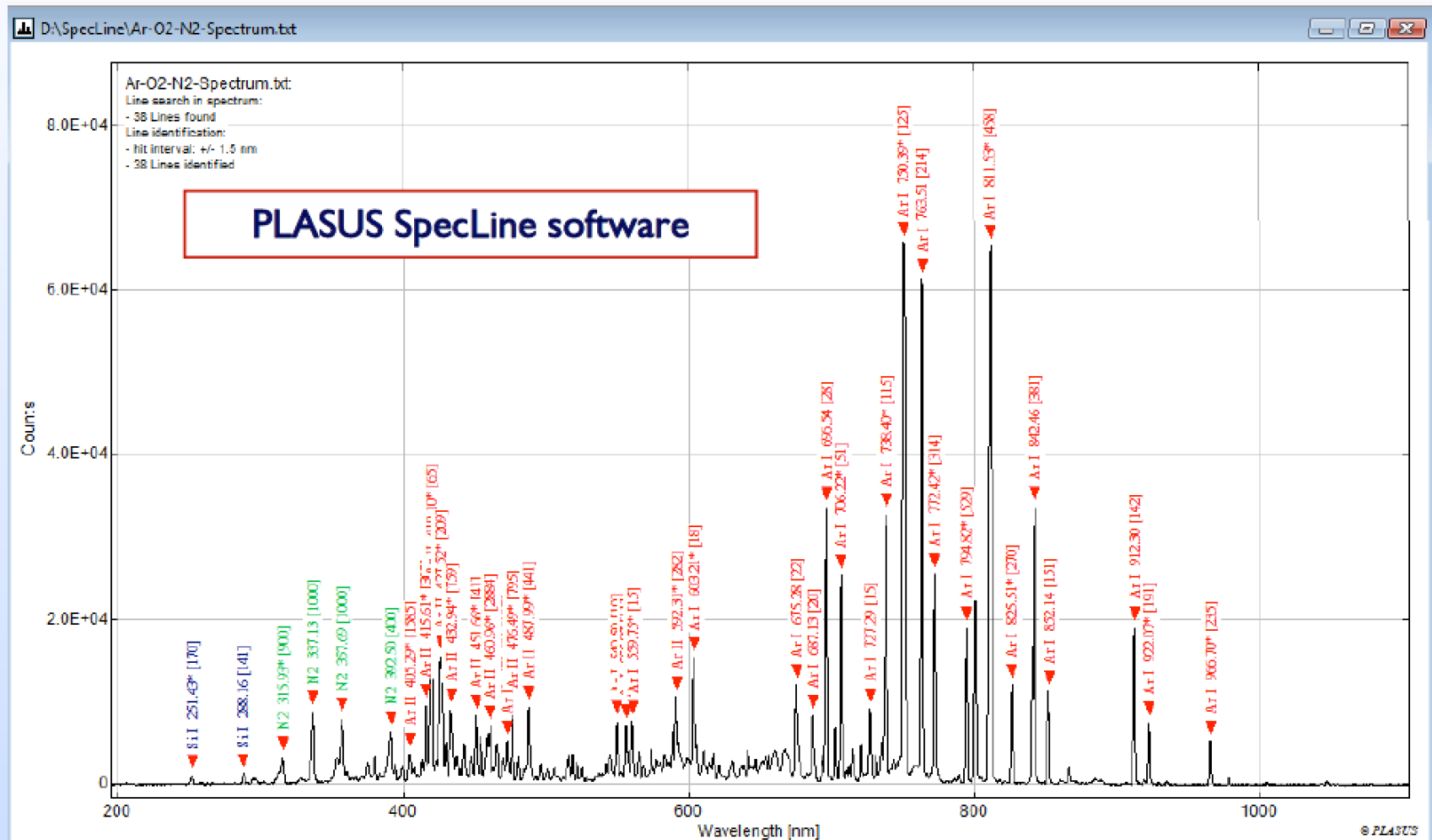
Excitation



Radiation

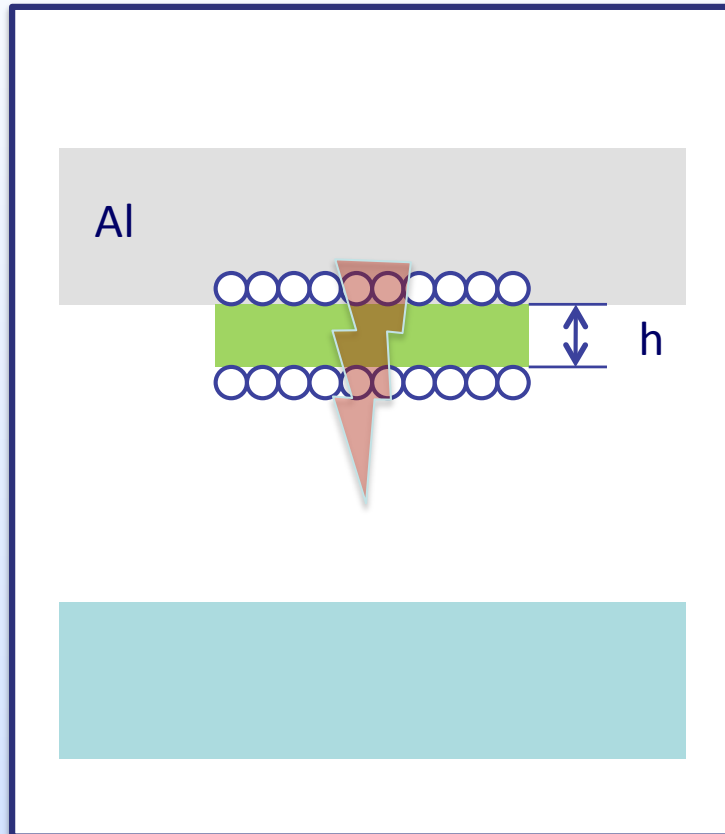


Plasma Emission Spectroscopy

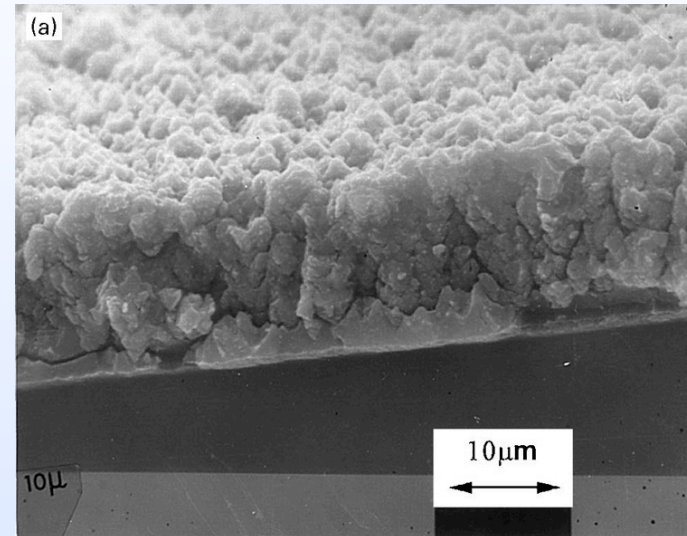


- Wavelength: elements species
- Intensity: plasma parameters, density of neutrals, ion and electrons
- Full Width Half Maximum: broadening mechanism (particle temperature)

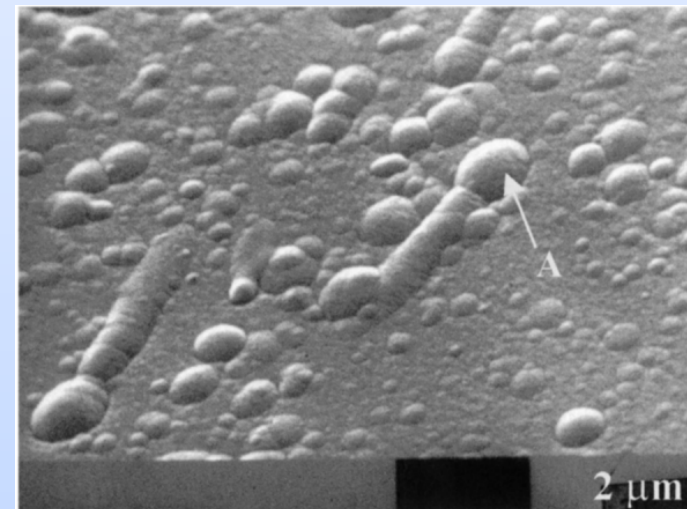
Bogenentladung



Metaldroplets in Al_2O_3 Schicht, die durch Bogen verursacht wurden (dc Sputtering)

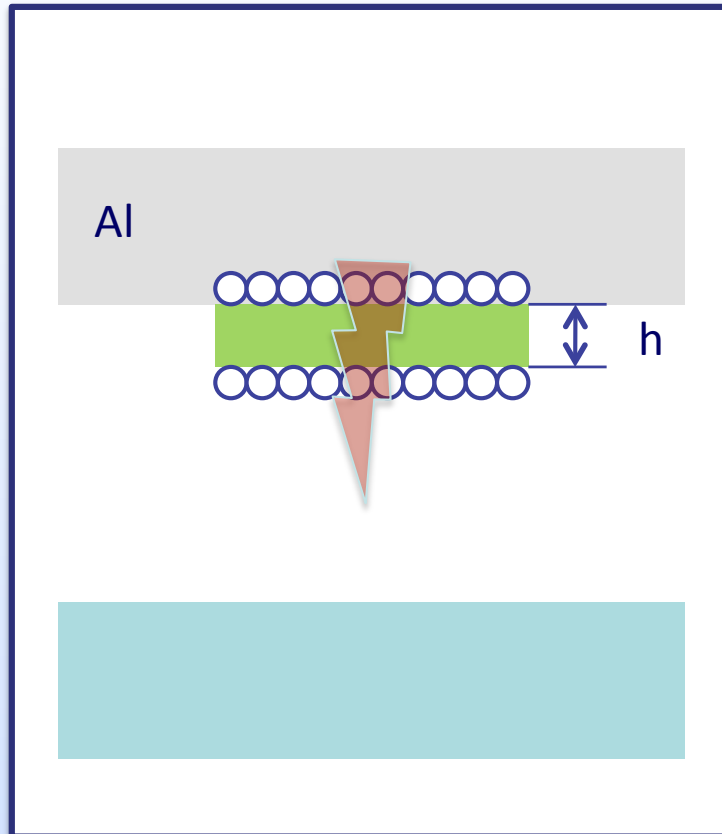


P.J. Kelly and R.D. Arnell in Vacuum 56 (2000) 159.



J. O'Brien and P.J. Kelly in Surface and Coatings Technology 142-144 (2001) 621.

Bogenentladung



$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{h}$$

$$V = \frac{q}{C} = \frac{J \cdot A \cdot t}{C} = \frac{J \cdot t \cdot h}{\epsilon_r \epsilon_0}$$

$$E = \frac{V}{h} = \frac{J \cdot t}{\epsilon_r \epsilon_0}$$

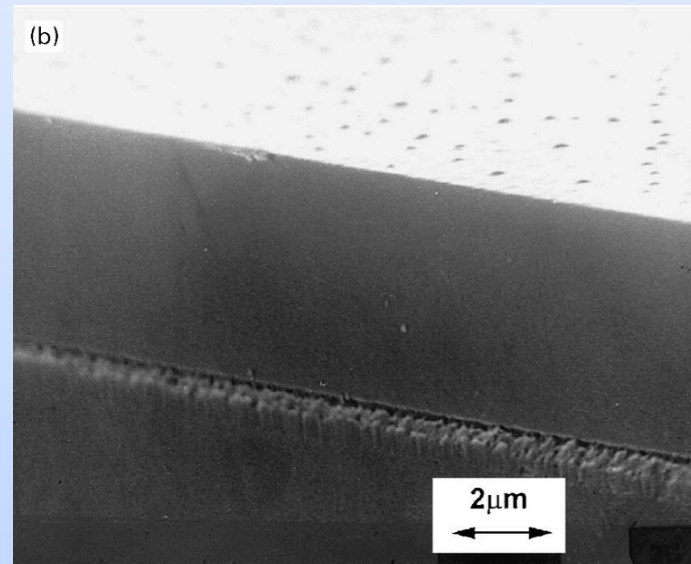
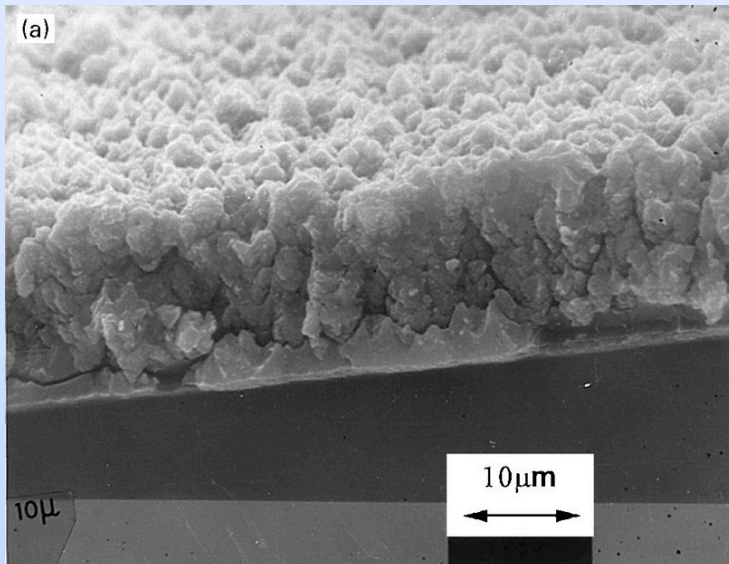
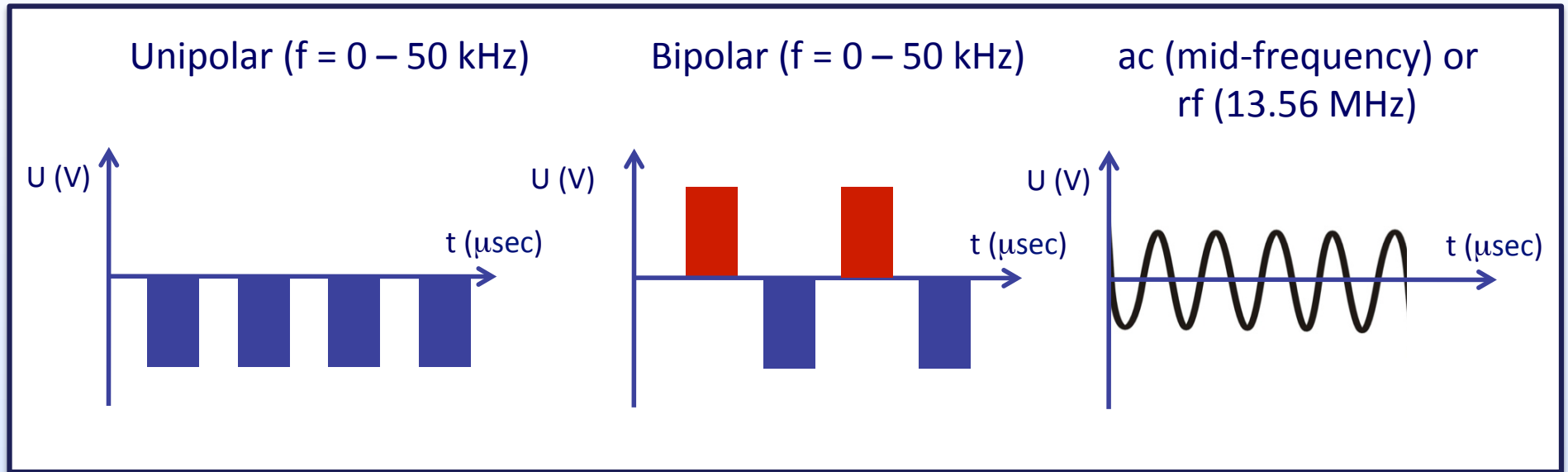
$$E = E_b \quad \text{Durchbruchfeld}$$

$$t = t_b$$

Für Al_2O_3

$$E_b = 10^6 \text{ V/cm}, \epsilon_r = 10, J = 100 \text{ mA/cm}^2, t_b = 8.85 \mu\text{s}$$

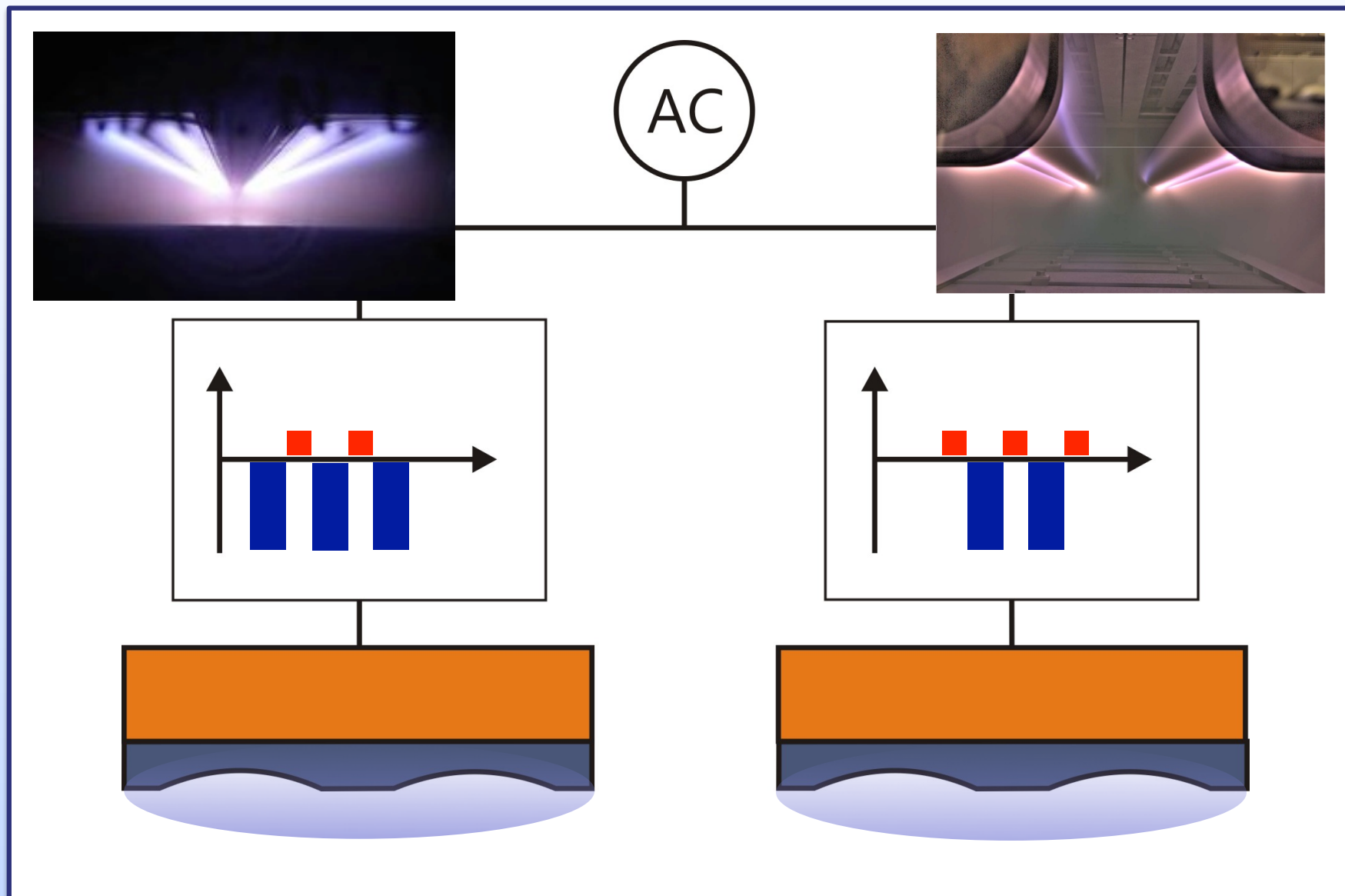
Gepulstes Sputtering



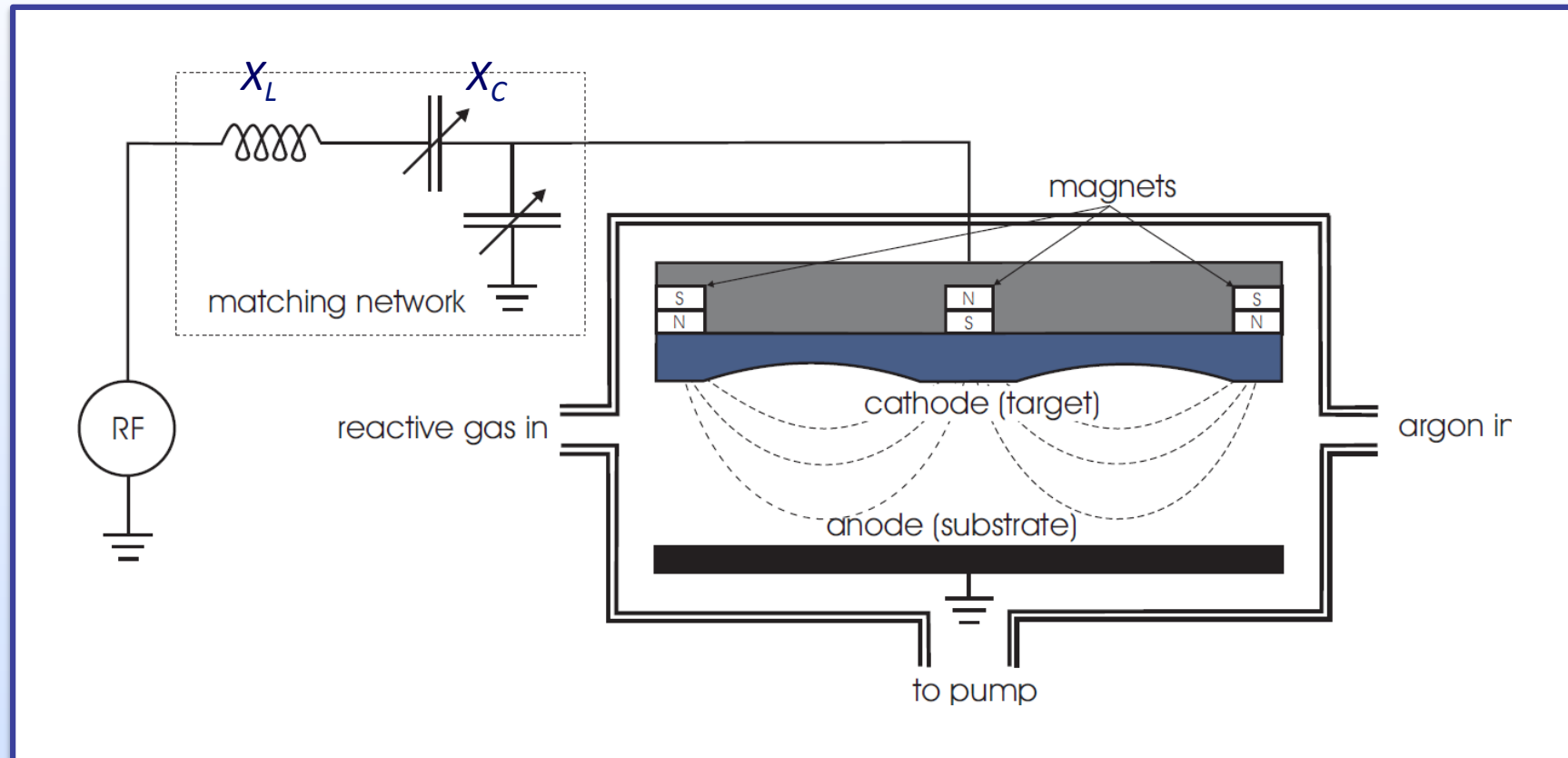
Al_2O_3
dc vs. pulsed:

P.J. Kelly and R.D. Arnell
in Vacuum 56 (2000) 159.

Twin Magnetron Sputtering



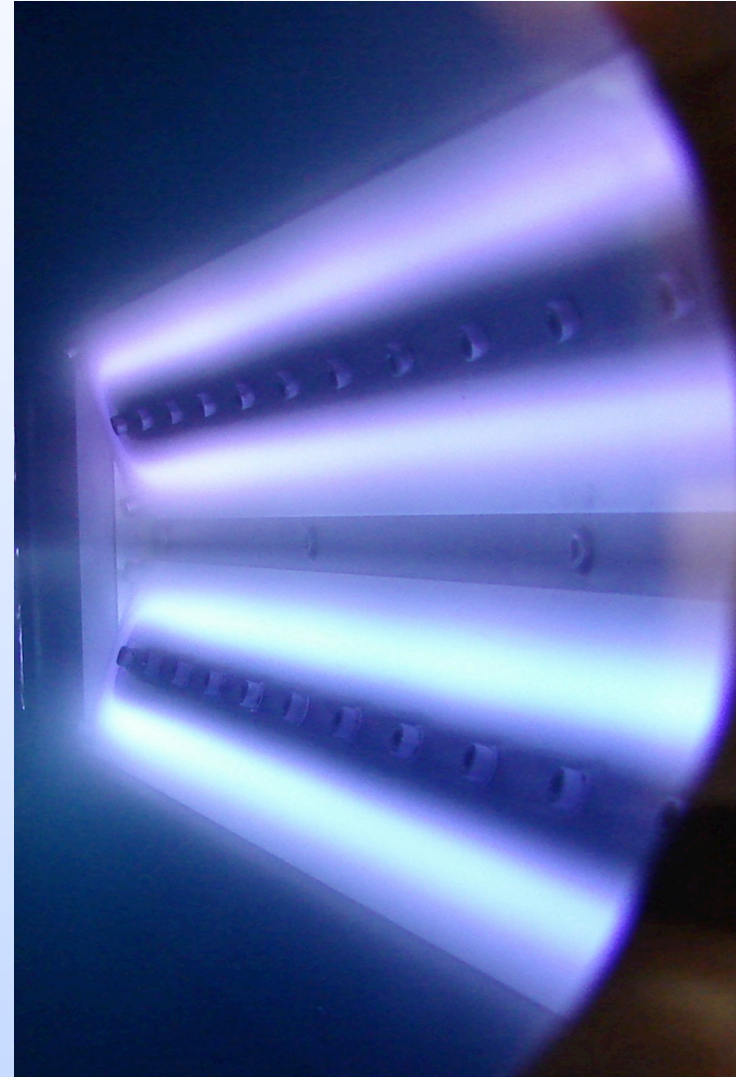
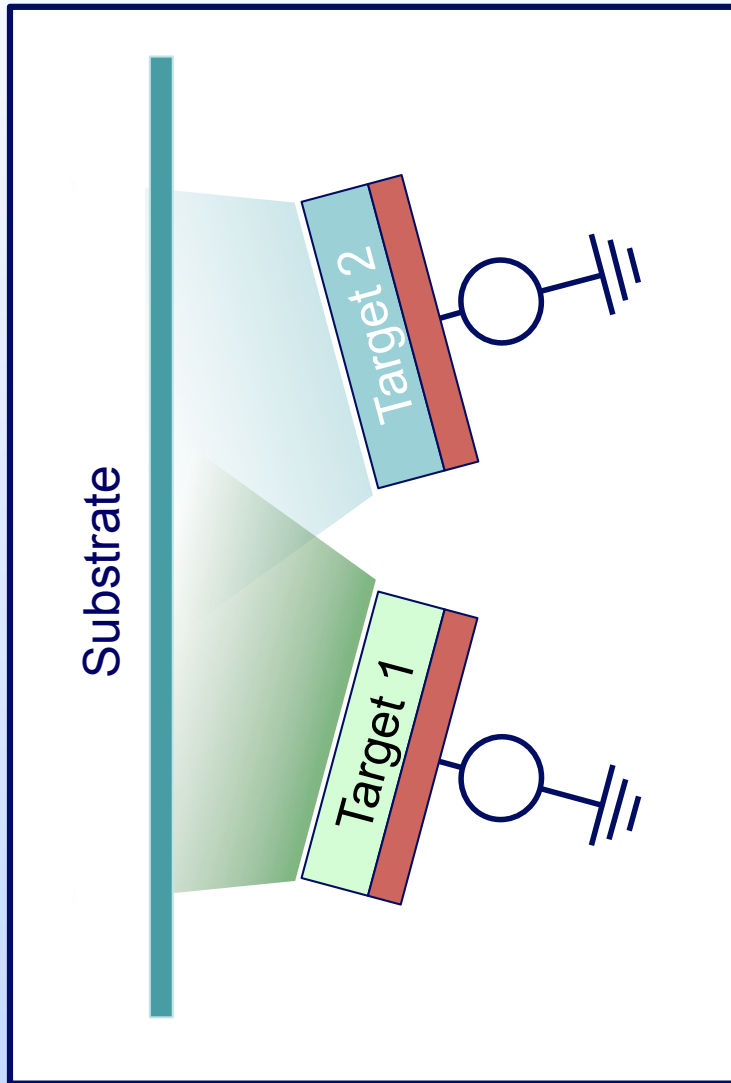
RF Sputtering System



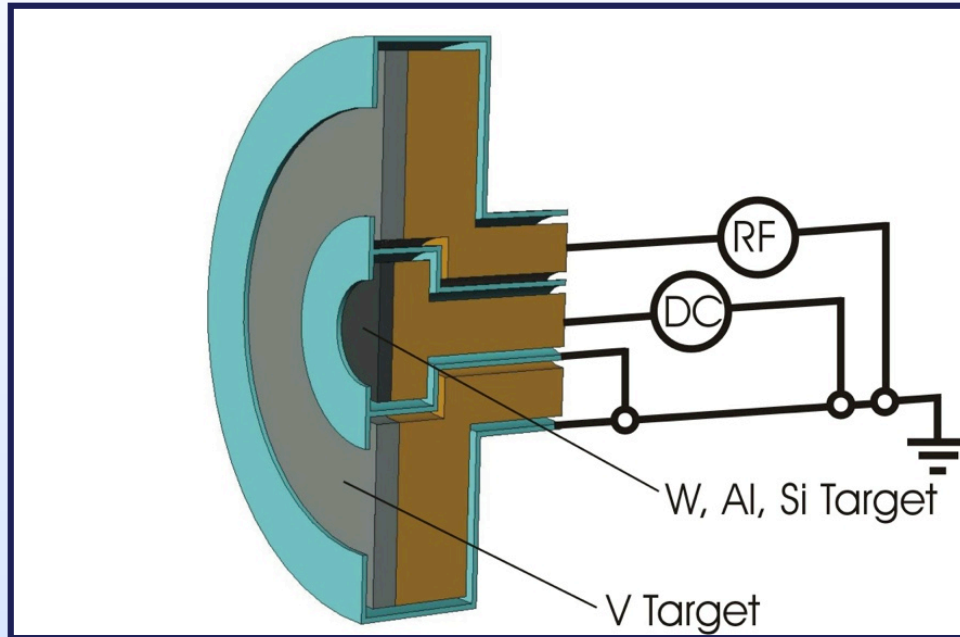
- frequency 13.56 MHz
- e⁻ trapped for a longer time
→ more collision
- increased discharge density

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^4$$

Co-Sputtering

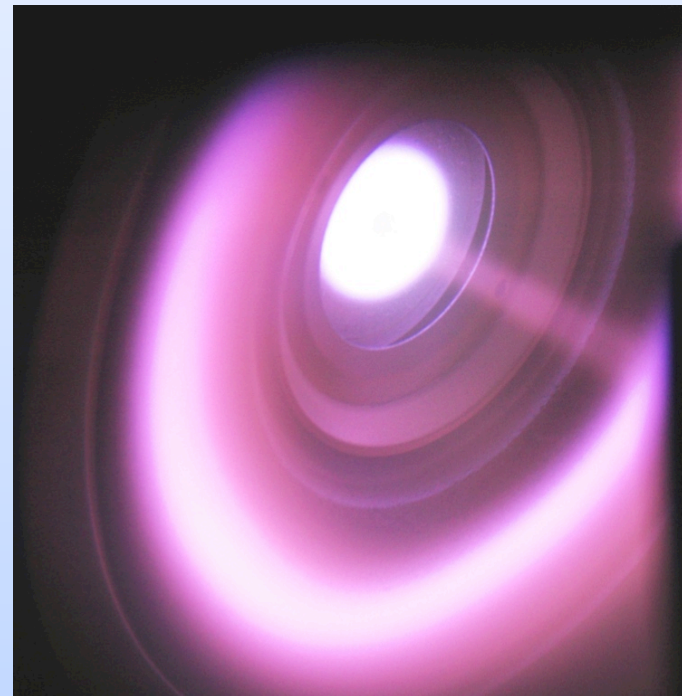


Co-Sputtering: Ring magnetron



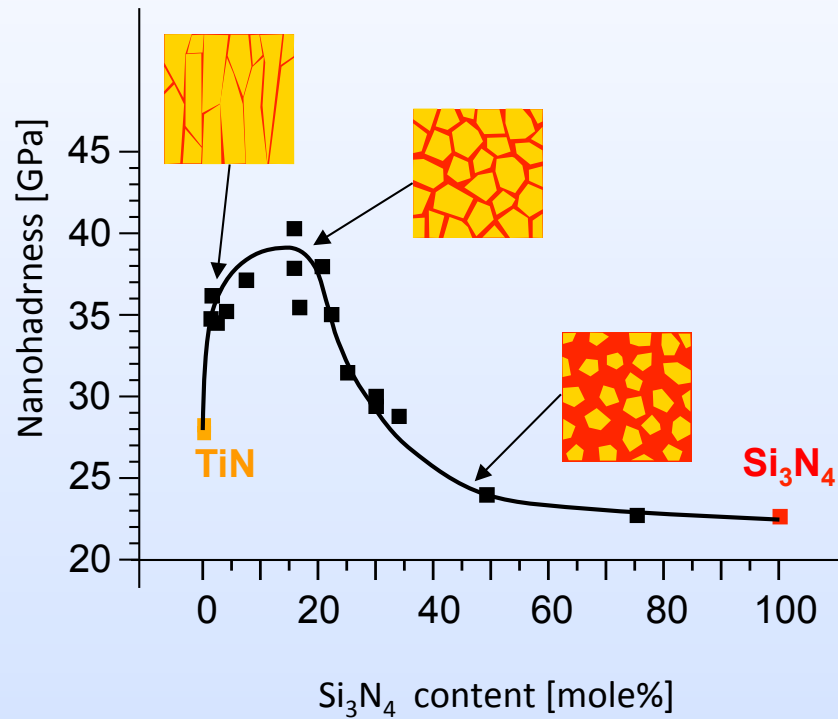
Picture from A. Romanyuk et al., Sol. En. Mat. Sol. Cells 91 (2007) 1831.

- verbesserte Homogenität
- breiterer Konzentrationsbereich



3D Nanostructured Hard Coatings

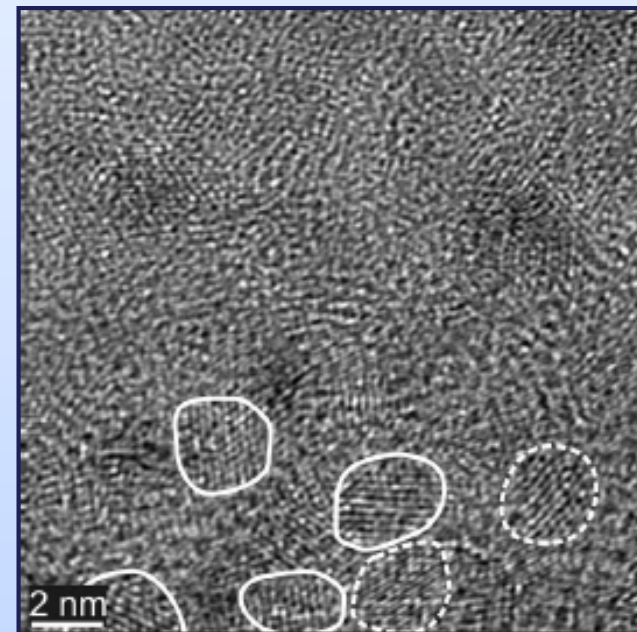
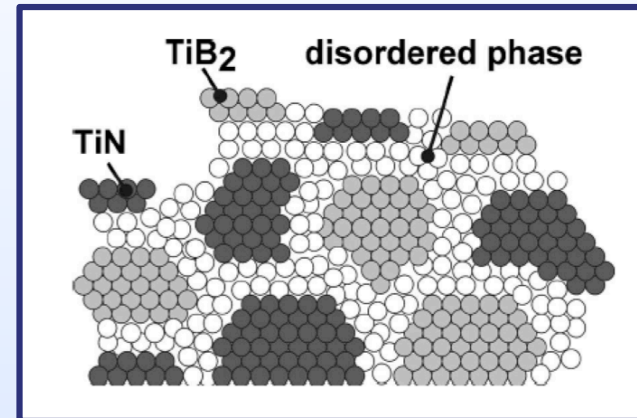
Ti-Si-N Nanocomposite



Picture courtesy of J. Patscheider (EMPA) adapted from S. Veprek et al., Surf. Coat. Technol 86-87 (1996) 394.

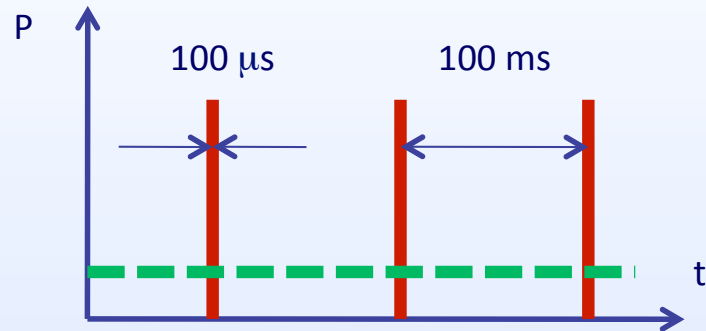
- Dislocation barrier due to $G(\text{TiN}) \neq G(\text{Si}_3\text{N}_4)$
- d_{\min} for dislocation formation $\approx 10 - 15 \text{ nm}$
- \Rightarrow no dislocations at $d = 5 \text{ nm}$!
- interfaces inhibit grain boundary sliding

Ti-B-N Nanocomposite



J. Green et al. in J. Appl. Phys. 100 (2006) 044301.

High Power Impulse Sputtering (HIPIMS)

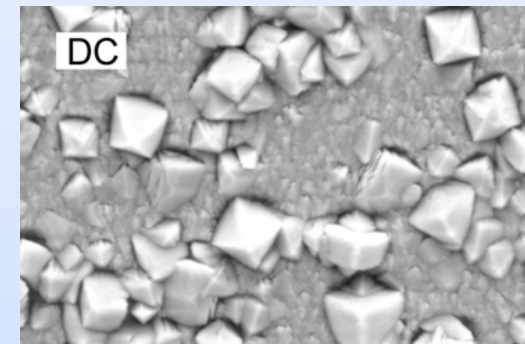
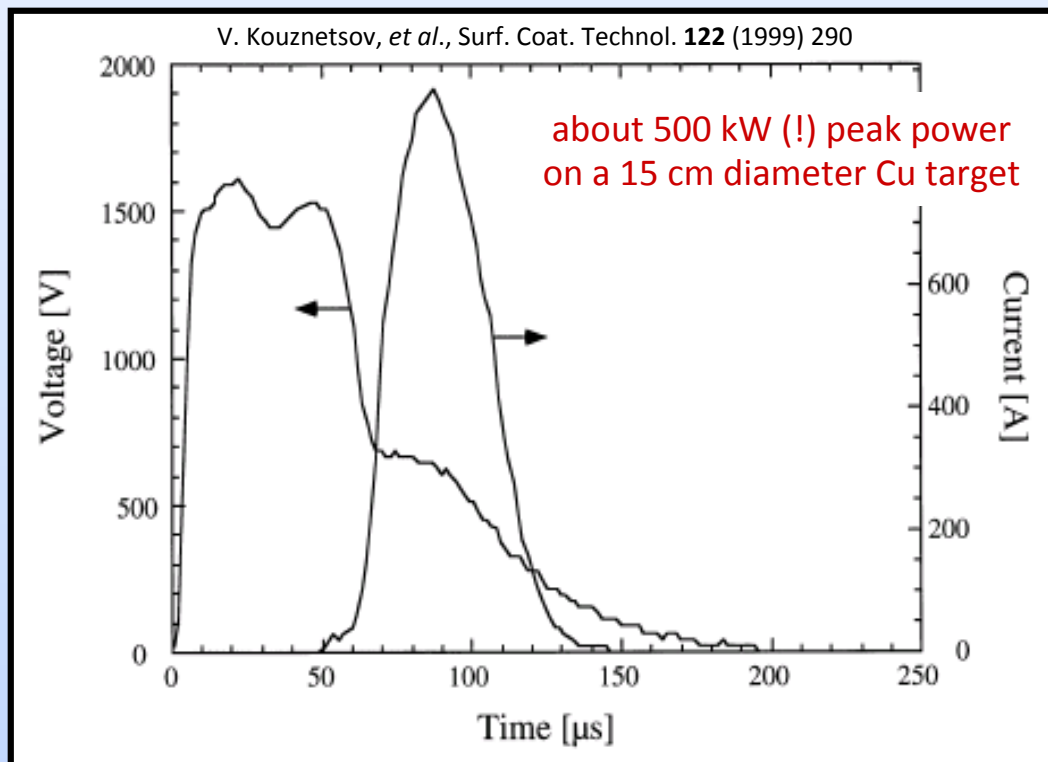


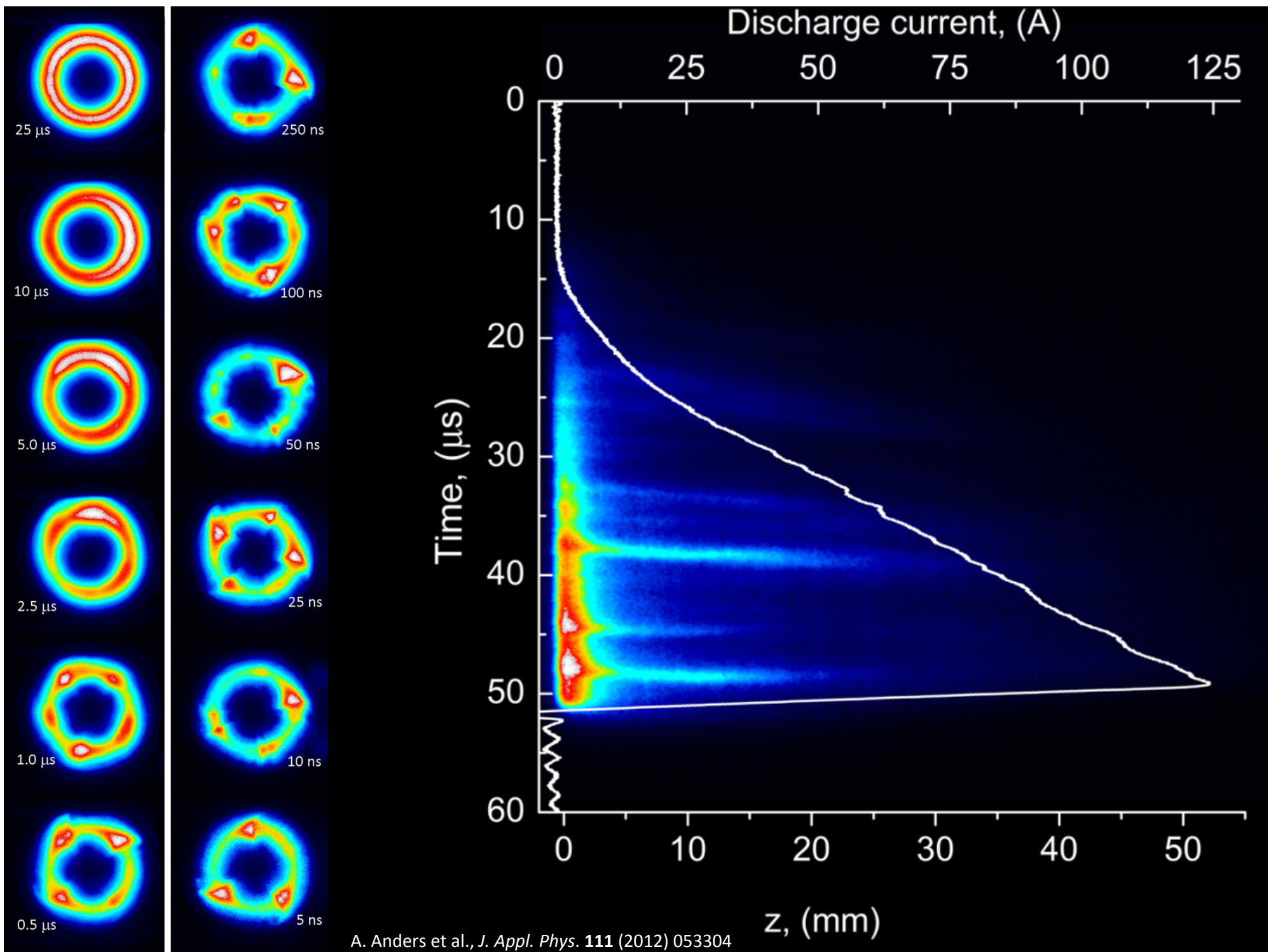
Vorteile:

- hohe Ionisationsrate
- dichte Schichten

Nachteile:

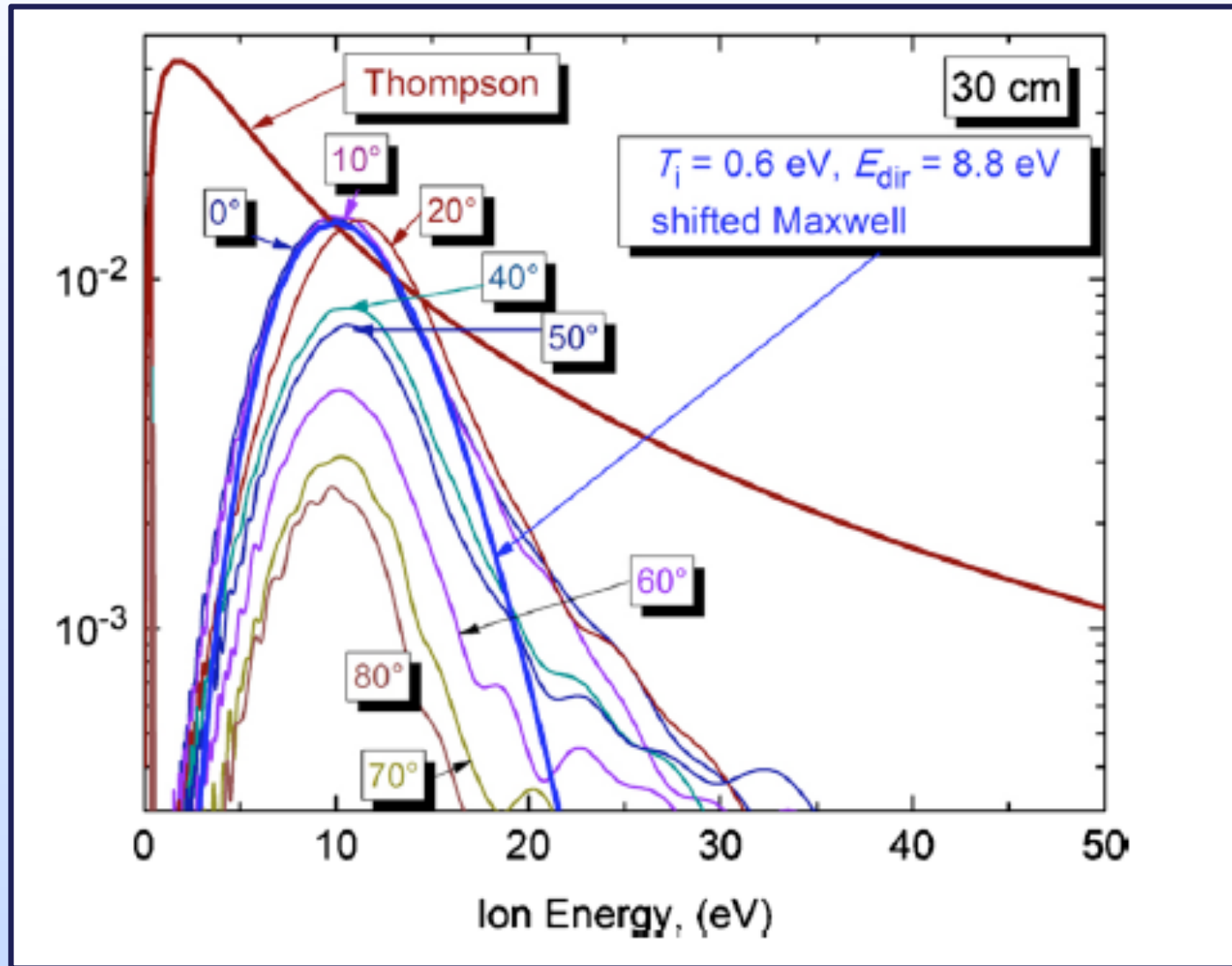
- Upscaling
- Prozesskontroll





A. Anders et al., *J. Appl. Phys.* **111** (2012) 053304

Energy distribution: Cu

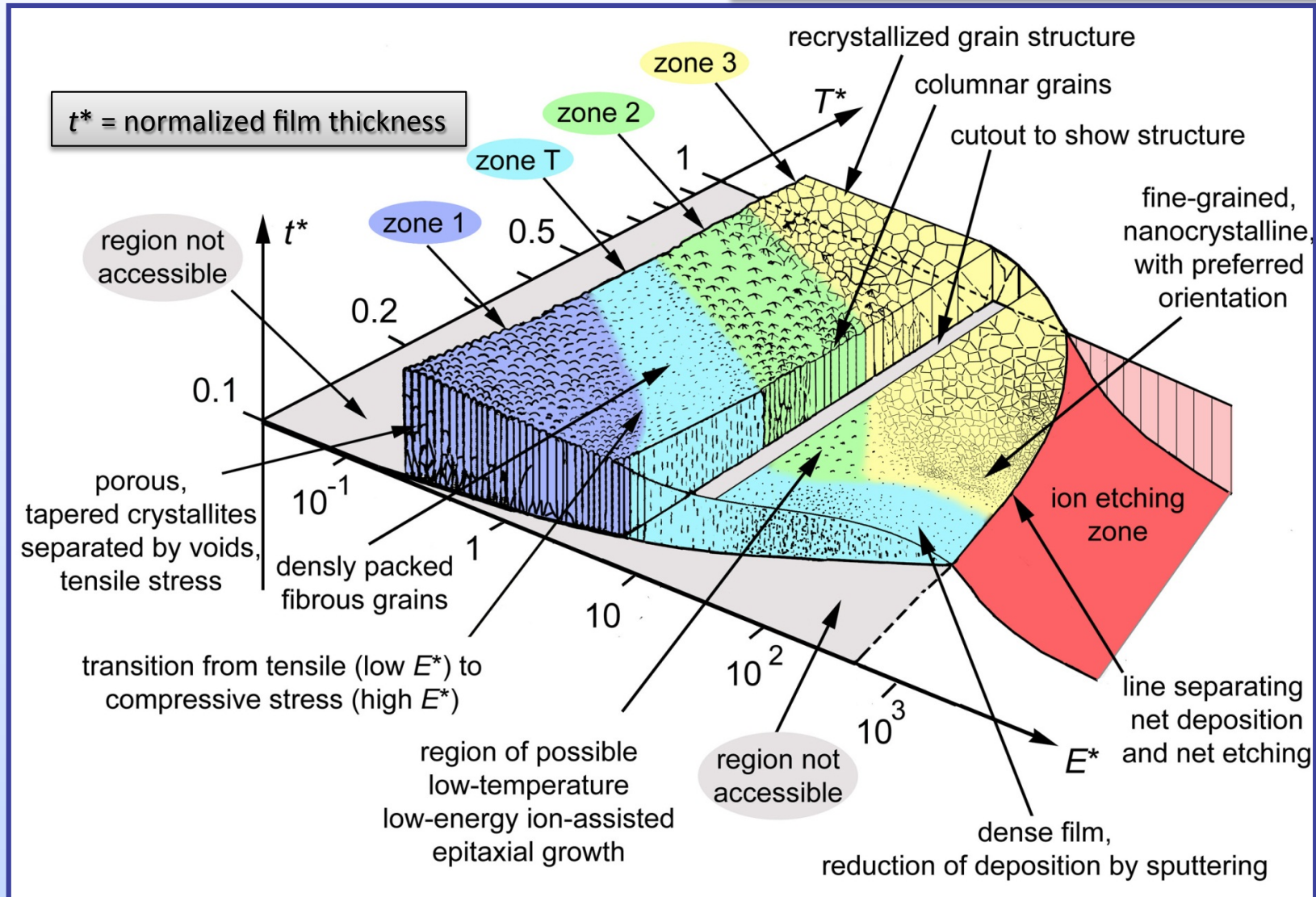


D. Horwat and A. Anders, Appl. Phys. Lett. 97 (2010) 221501.

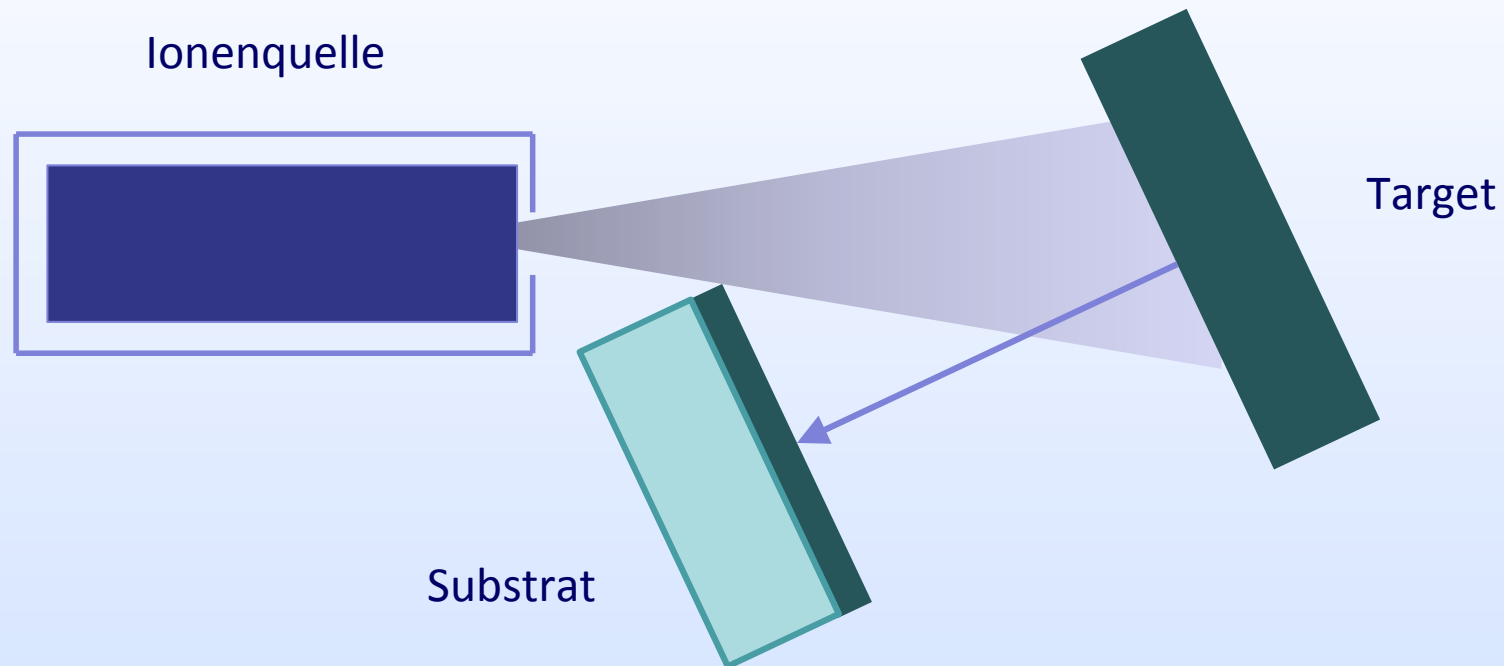
Anders's structure zone diagram

A. Anders, Thin Solid Films 518 (2010) 4087

T^* = normalized temperature and potential energy



Abscheidung durch Ionenstrahl



Vorteile:

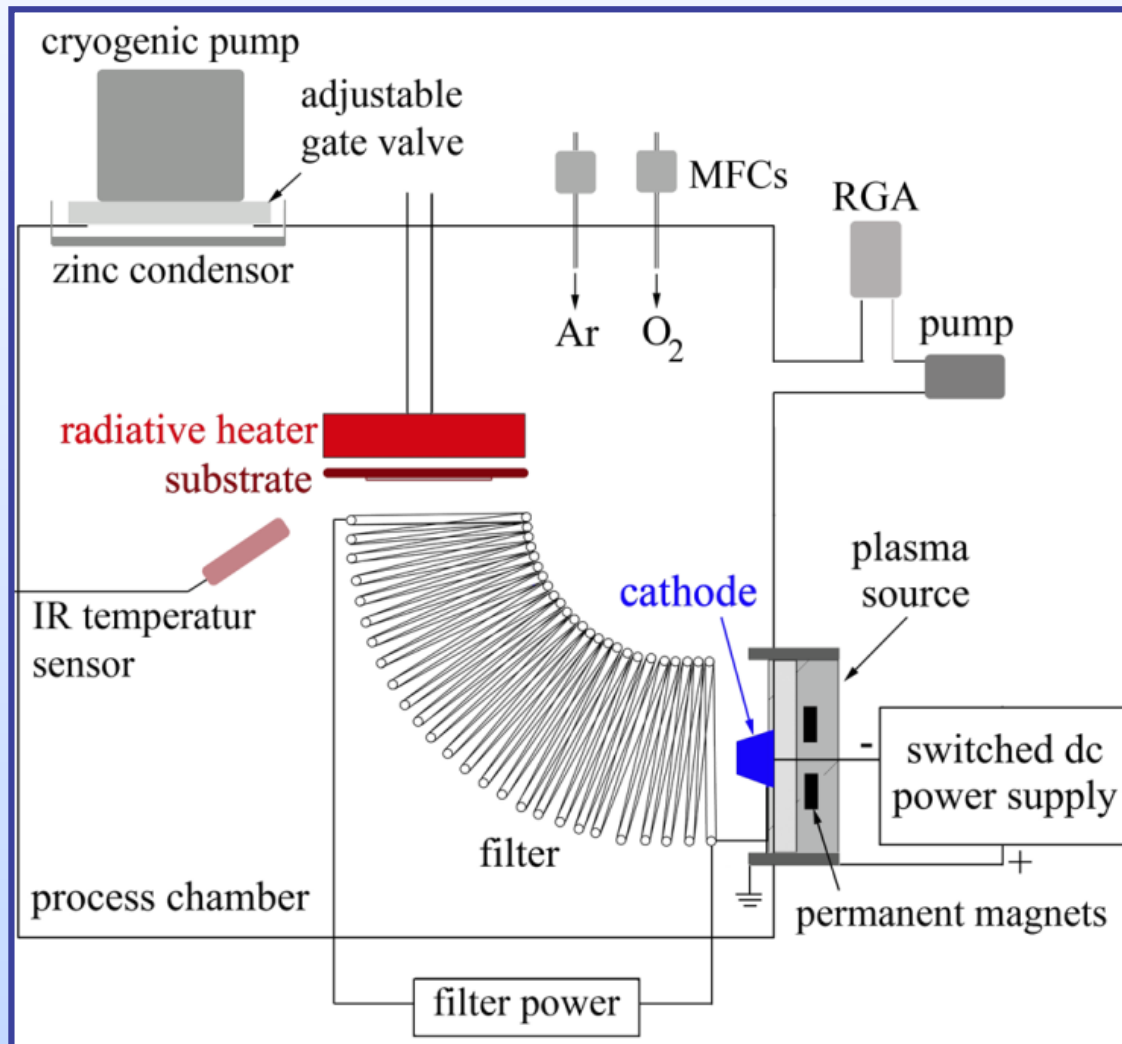
- niedriger Druck
- kontrollierte Ionenenergie
- wenige Heizung durch e- Beschuss

Nachteile:

- grossflächige Abscheidung
- Kontaminationen
- Zuverlässigkeit

Filtered Cathodic Arc Deposition

$$E_i = Q(V_P - V_b) + E_0$$



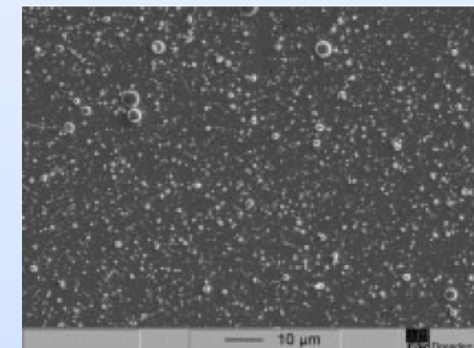
Vorteile:

- hohe Ionisierungsgrad des Plasmas
- dichte, haftfeste Schichte

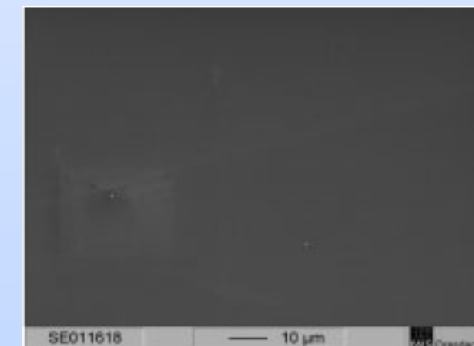
Nachteile

- Droplets

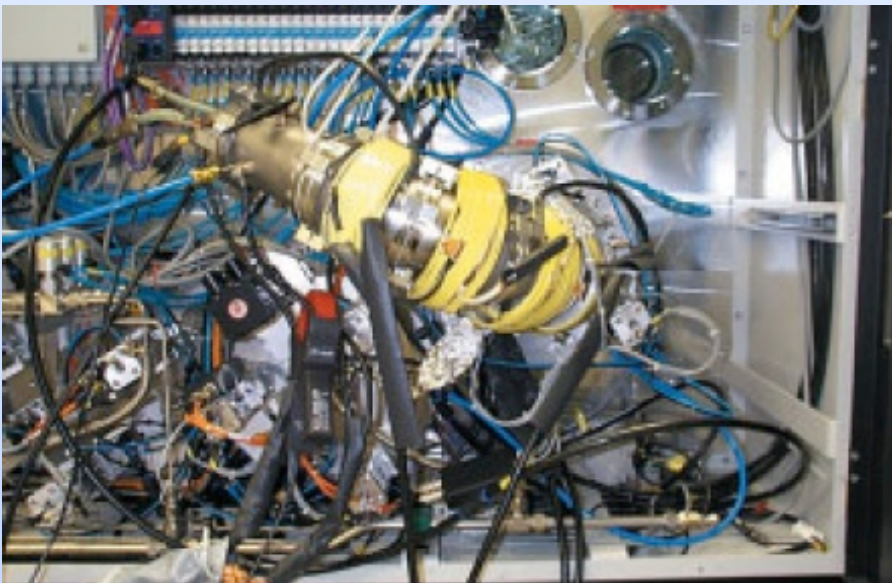
ohne Filter



mit Filter



Filtered Cathodic Arc Deposition



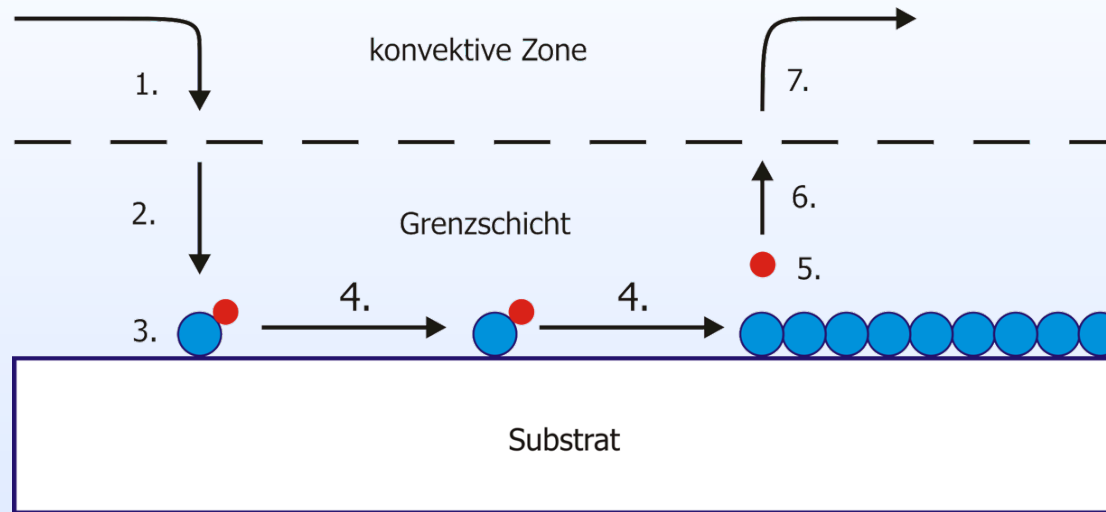
Anwendungen:

- Festplatten
- Mikroelektronik
- Hartstoff und Verschleisschutzschichten auf Werkzeugen

Chemical Vapor Deposition (CVD)

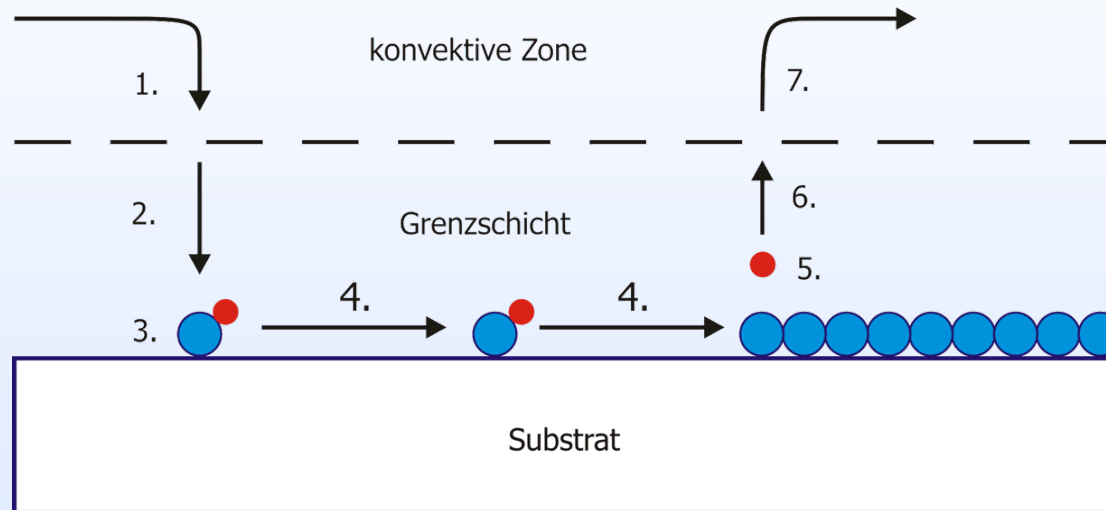
- Reaktionsgase werden **gasförmig (vapor)** zugeführt
- abgeschiedene Schicht ist Ergebnis **einer chemischen Reaktion** dieser Gase
- Reaktion wird durch **Energiezufuhr** angeregt
- gasförmige Reaktionsprodukte werden durch Gasregelsystem abtransportiert

Chemical Vapor Deposition (CVD)



1. Transport der Reaktanten durch **erzwungene Konvektion** in die Abscheide-Region
2. Transport der Reaktanten durch **Diffusion** durch die Grenzschicht hindurch zur Substratoberfläche
3. **Absorption** der Reaktanten an der Substratoberfläche
4. **Oberflächenreaktion:** Dissoziation der Moleküle, Oberflächendiffusion der Radikale, Einbau der Radikale in den Festkörperverband, Bildung der flüchtigen Reaktionsnebenprodukte
5. **Desorption** der flüchtigen Reaktionsnebenprodukte
6. Transport der Reaktionsnebenprodukte mittels **Diffusion durch Grenzschicht**
7. Abtransport der Reaktionsnebenprodukte durch erzwungene **Konvektion**

Rate des Schichtwachstum



- Bei niedriger **Prozesstemperatur** bzw. niedrigem **Prozessdruck**:
 - Reaktionslimitierte Prozessführung

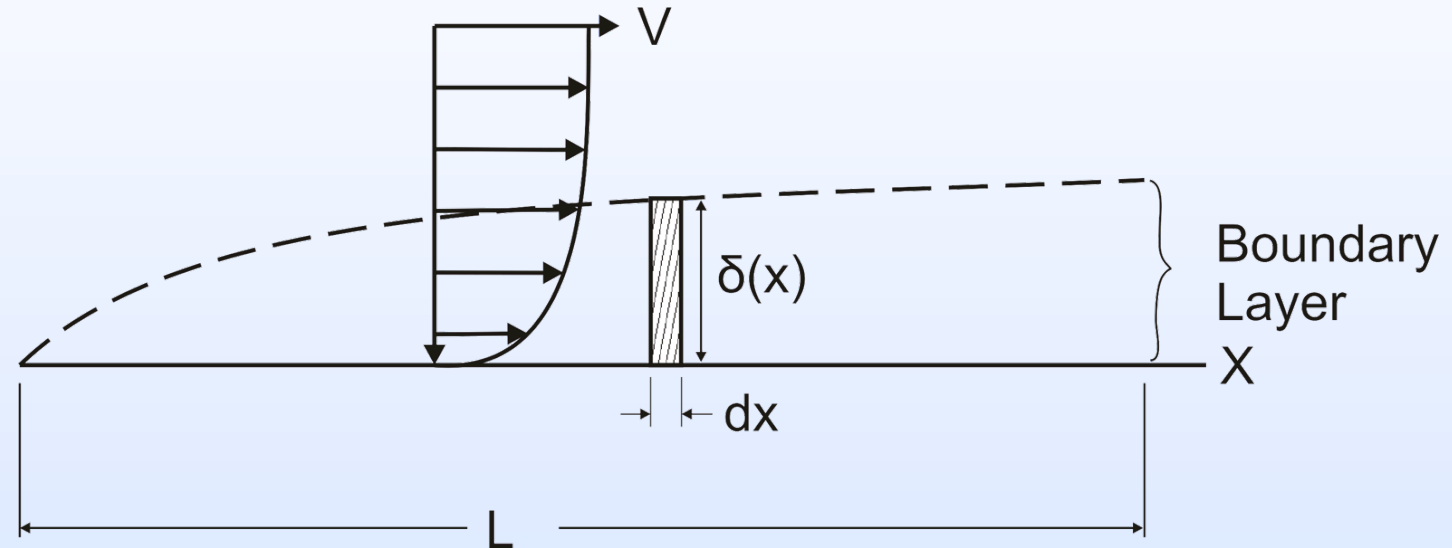
- Bei hoher **Prozesstemperatur** bzw. hohem **Prozessdruck**:
 - Transport- oder diffusionslimitierte Prozessführung

Woher kommt die Grenzschicht?



- Die Geschwindigkeit einer Strömung fällt an der Oberfläche zu einem Festkörper auf Null ab
- Reaktionspartner können durch konvektive Strömung nur in die Nähe der Grenzschicht transportiert werden und müssen den Rest des Weges durch Diffusion zurücklegen

Dicke der Grenzschicht



$$\delta(x) = \sqrt{\frac{\eta}{\rho V} x}$$

$$\delta_m = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\eta L}{\rho V}}$$

- η, ρ, V = Viskosität, Dichte, Geschwindigkeit des Reaktanten
- x = laterale Position; L = Abmessung des Substrattellers

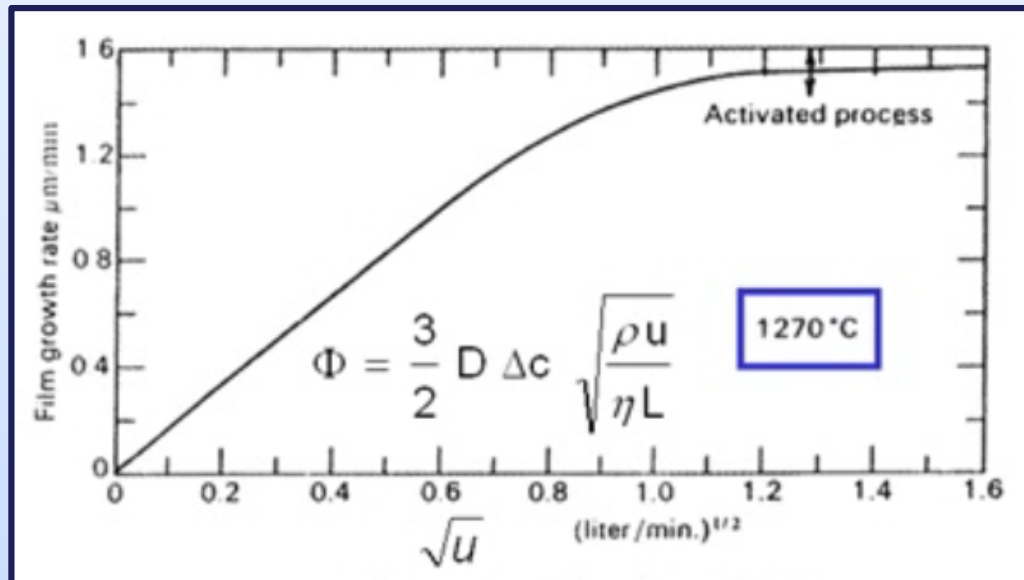
Diffusion durch der Grenzschicht

Diffusion der Reaktanten zur Oberfläche

- Φ = Massenfluss der Reaktanten
- D = Diffusionskoeffizient

$$\Phi = -D \frac{dc}{dz}$$

Mit dem Modell der Grenzschicht ergibt sich:



$$\Phi = \frac{3}{2} D \Delta c \sqrt{\frac{\rho V}{\eta L}}$$

Marc Madou, Fundamentals of microfabrication

- D = druckabhängig
- L = abhängig von Geometrie des Reaktors

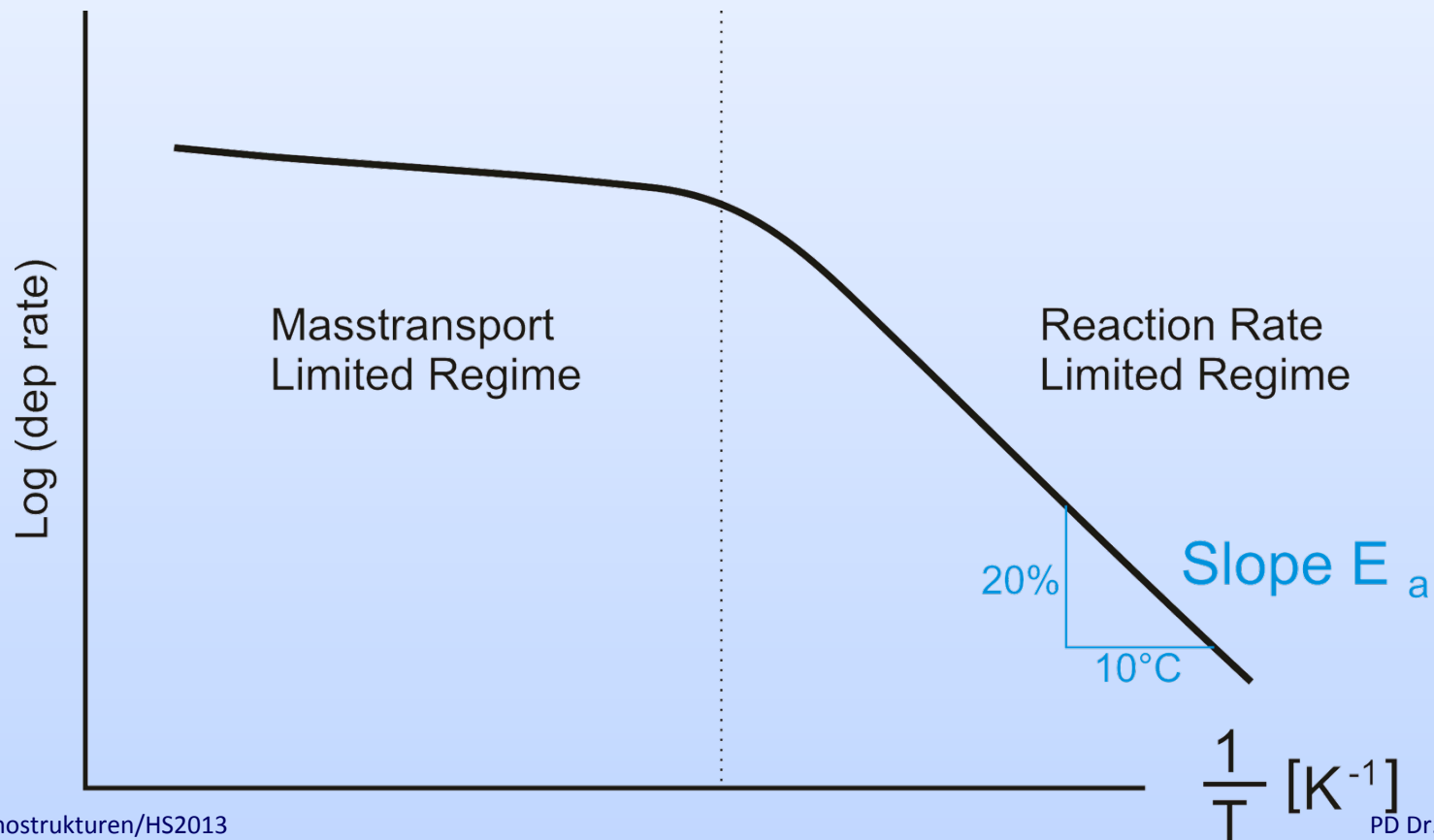
Diffusion durch der Grenzschicht

Rate der Oberflächenreaktion

- E_a = Aktivierungsenergie
- kT = Thermische Energie

$$R = R_0 \exp \frac{E_a}{kT}$$

Mit dem Modell der Grenzschicht ergibt sich:



Energiezufuhr bei CVD

Thermische Energiezufuhr

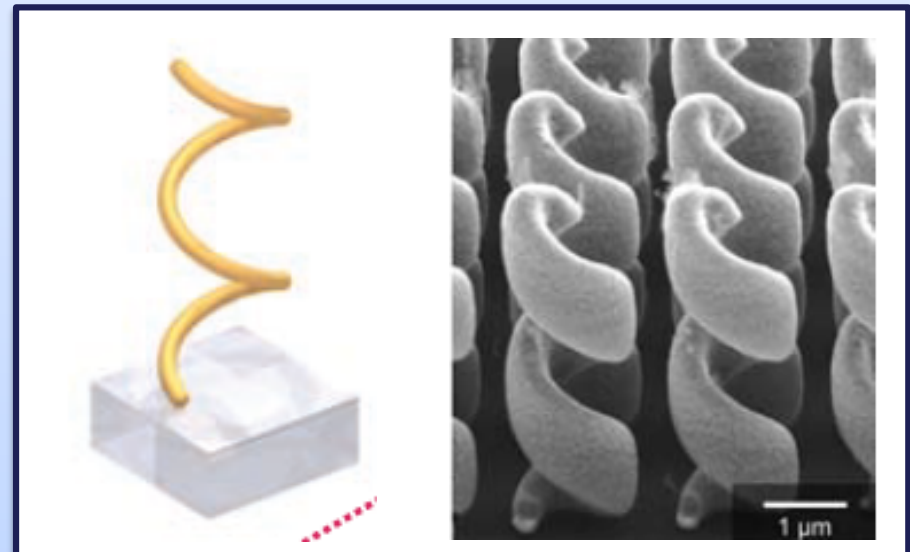
- Thermische Energiezufuhr ist Standard
- Induktions-, Strahlungs-, oder Widerstandsheizung des Substrates

Elektrische Energiezufuhr (Plasma):

- Ein Teil der Reaktionsenergie wird von einem Plasma geliefert, daher Plasma Enhanced CVD (PECVD)

Optische Energiezufuhr (Laser):

- Ermöglicht 3D-Schichtwachstum bei niedrigen Temperaturen



Atmospheric and Low Pressure CVD (APCVD & LPCVD)

Atmospheric Pressure CVD (APCVD)

- Typischer Druckbereich: ca. 100 kPa (=Atmosphäre) – 10 kPa
- Typischer Reaktionsführung: Transport-/Diffusionslimitiert

Anwendung:

- Abscheidung von SiO_2 Schichten bei 300°C bis 400°C
- Epitaxie von Silizium-Schichten bei > 850°C

Low Pressure CVD (LPCVD)

- Typischer Druckbereich: ca. 100 – 10 Pa
- Typischer Reaktionsführung: Reaktionslimitiert

Anwendung:

- LPCVD Polysilizium und SiO_2
- Temperatur liegt im Bereich von 400°C bis 700°C

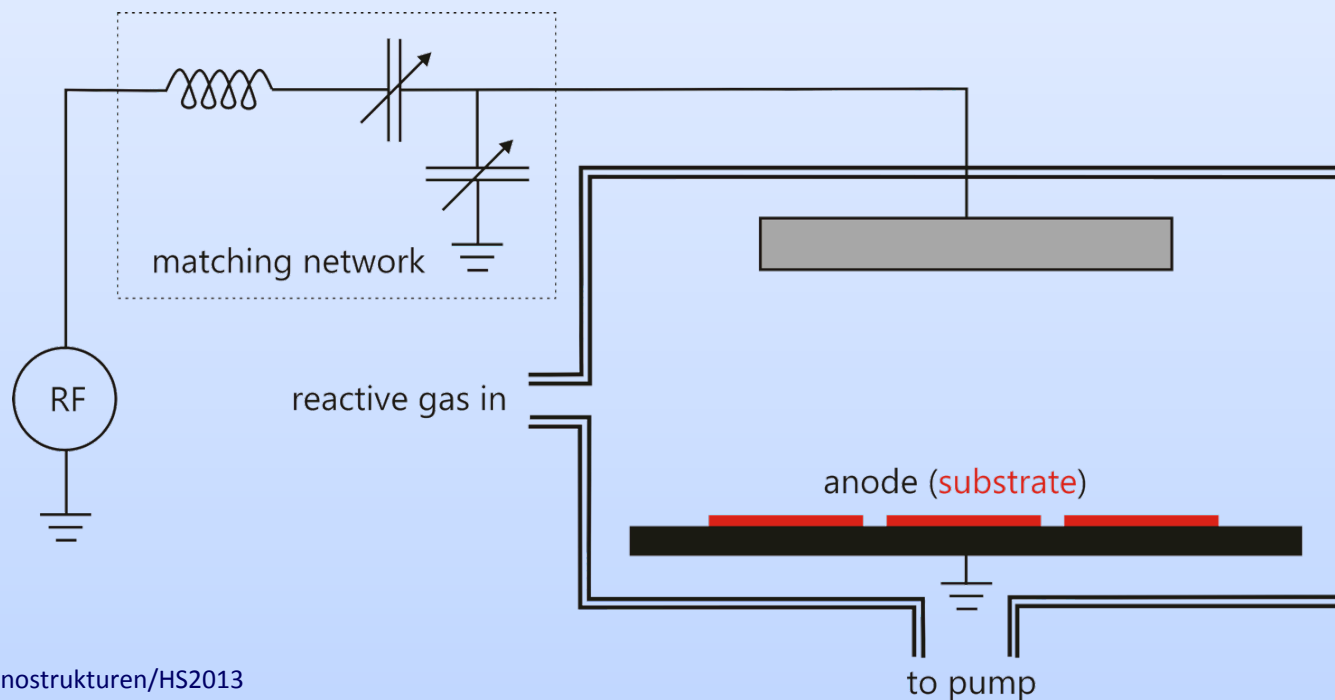
Plasma Enhanced CVD (PECVD)

Prozess:

- Prozessdruck: 10 – 500 Pa
- Prozesstemperatur: 250°C – 400°C
- Radikale des Prozessgas sind sehr reaktiv => reagieren auf der Oberfläche

Typische Schichten:

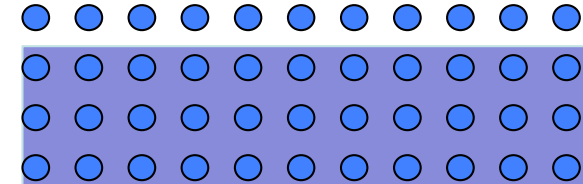
- Si_3N_4 , SiO_2 , SiC
- Schichten sind meistens nicht stöchiometrisch korrekt (Ionen- Bombardement, Einbau von inert Gas)



Epitaxie

Homoepitaxie:

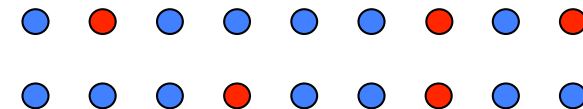
- Aufwachsen von Schichten aus gleichem Material



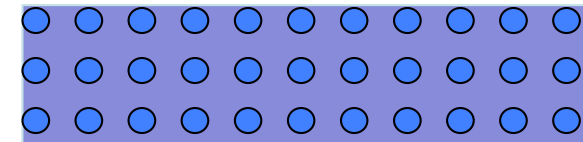
Heteroepitaxie:

- Aufwachsen von Schichten aus unterschiedlichem Material

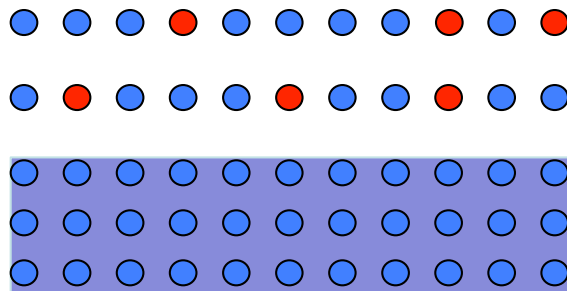
SiGe



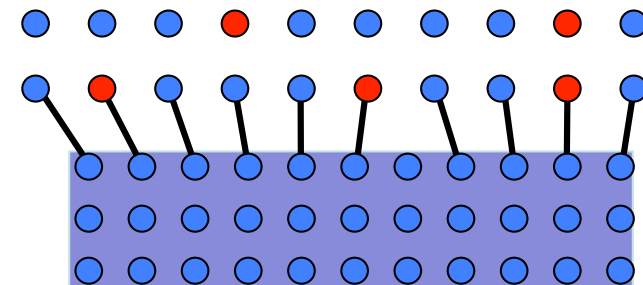
Si



verspanntes SiGe (pseudomorph)



relaxiertes SiGe



Epitaxie-Verfahren

CVD-Verfahren (z.B. APCVD)

Liquid Phase Epitaxie (LPE)

- Wafer wird in Schmelze eingetaucht und unter kontrollierten Bedingungen herausgezogen

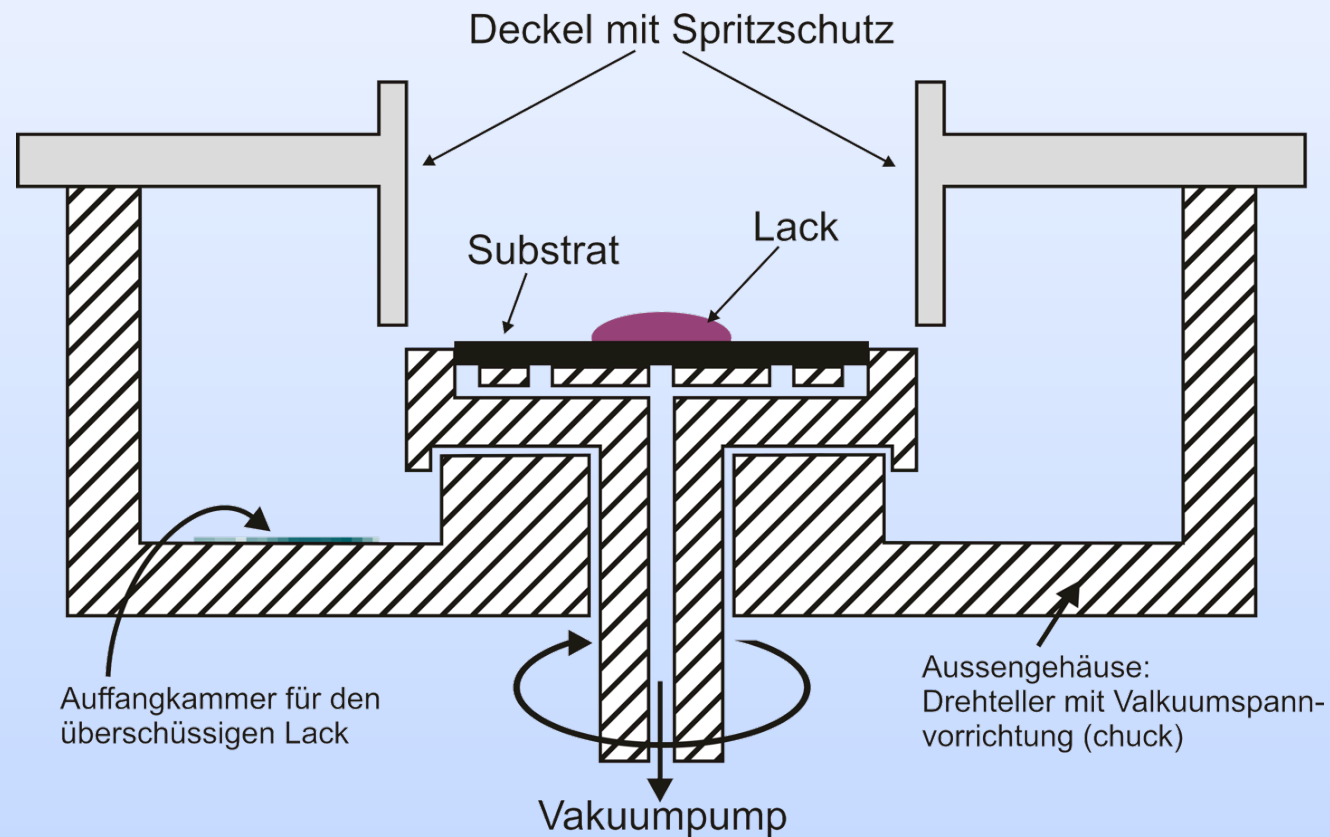
Molecular Beam Epitaxie (MBE)

- Prozessierung im Höchstvakuum
- Molekularstrahl wird rasterförmig über Oberfläche gescannt
- Wachstumprozess lässt sich dafür Atomlagengenau steuern

Anwendungsbereiche: double heterostructure laser, quantum well laser, quantum cascade laser, separate confinement heterostructure lasers, distributed feedback lasers, vertical-cavity surface-emitting lasers, external-cavity diode lasers

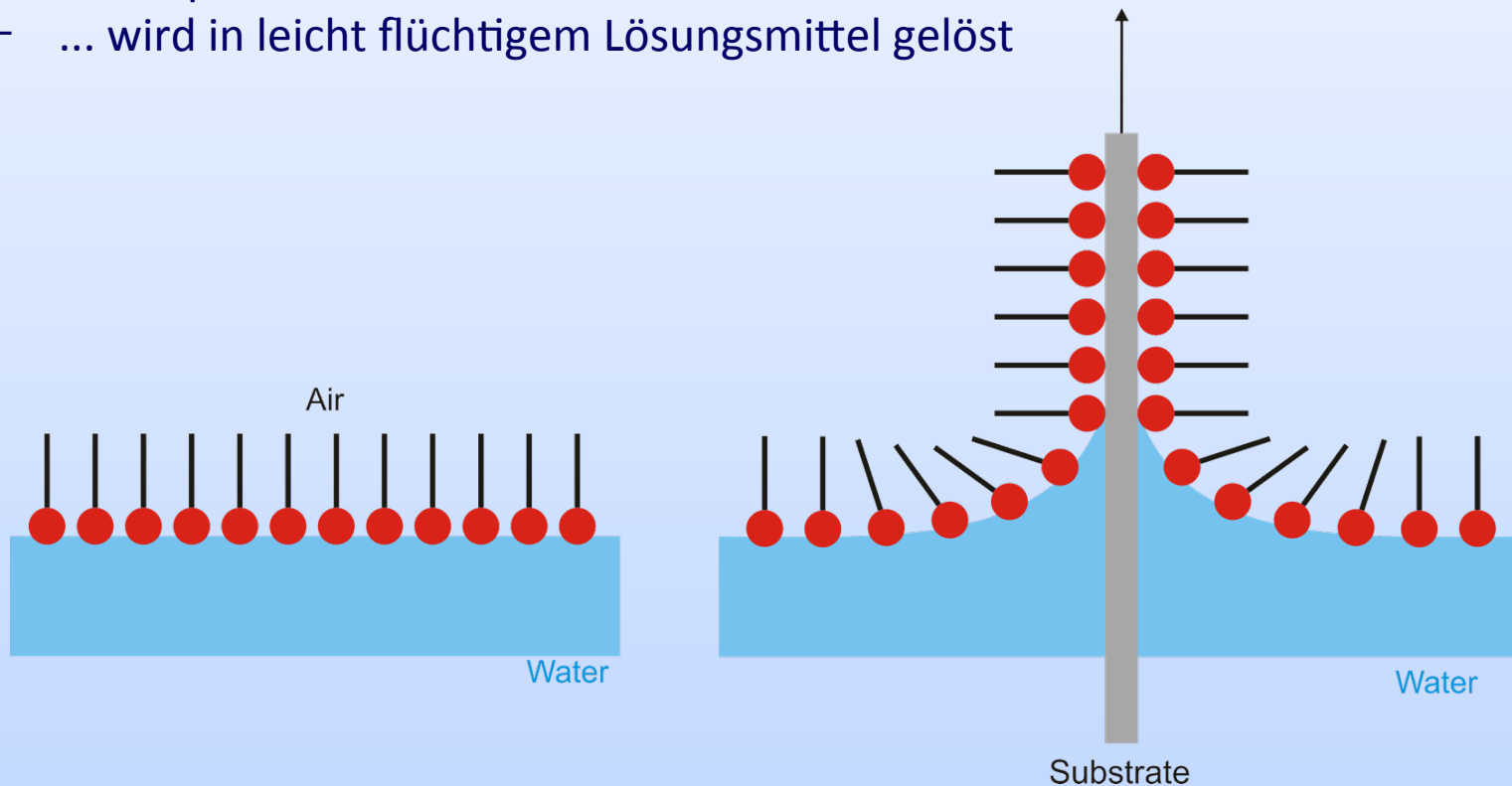
Spin Coating

- Flüssiges Medium in Substratmitte aufbringen
- Zentrifugalkräfte verteilen das Medium gleichmässig auf Substrat

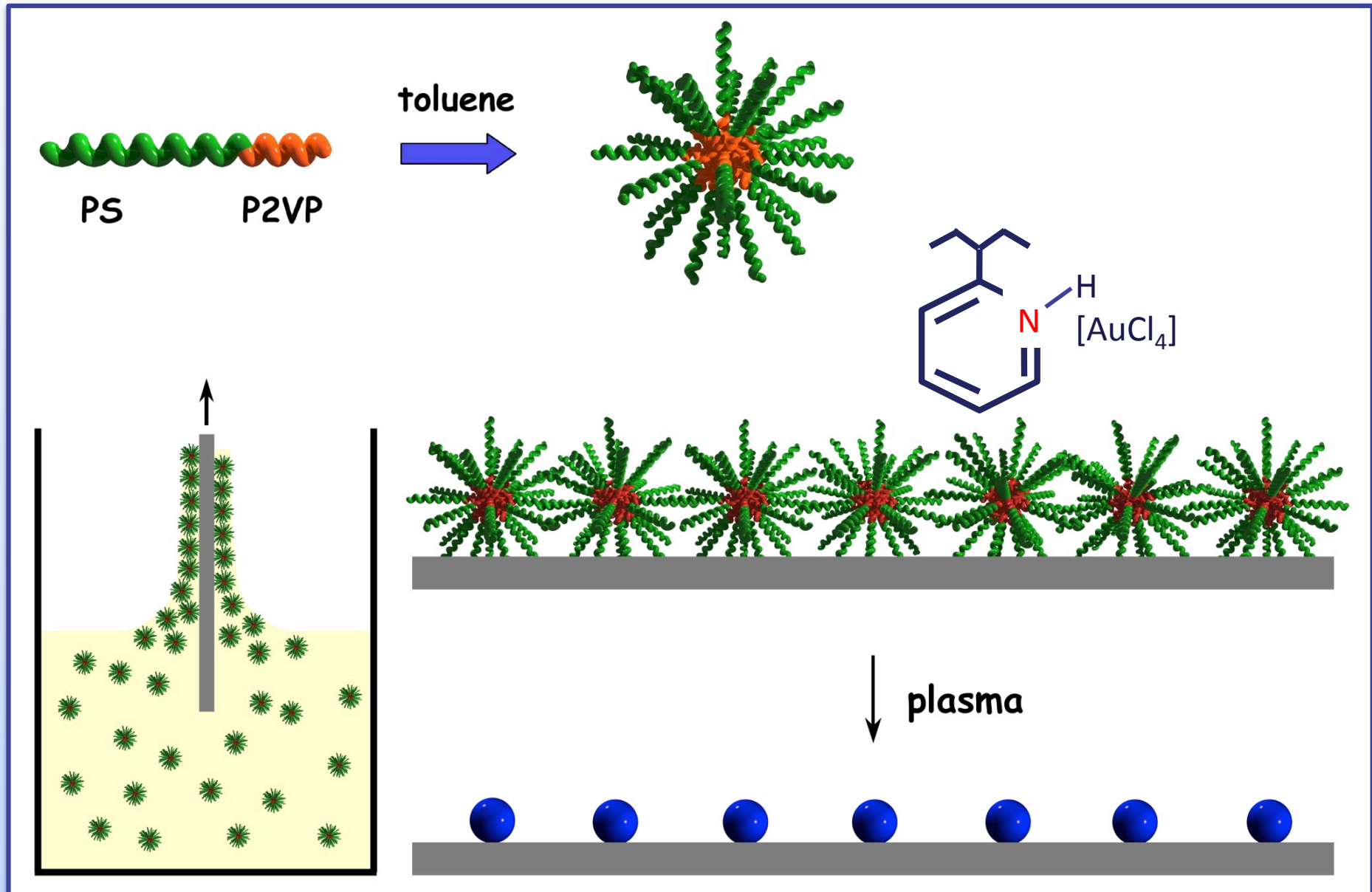


Langmuir-Blodgett

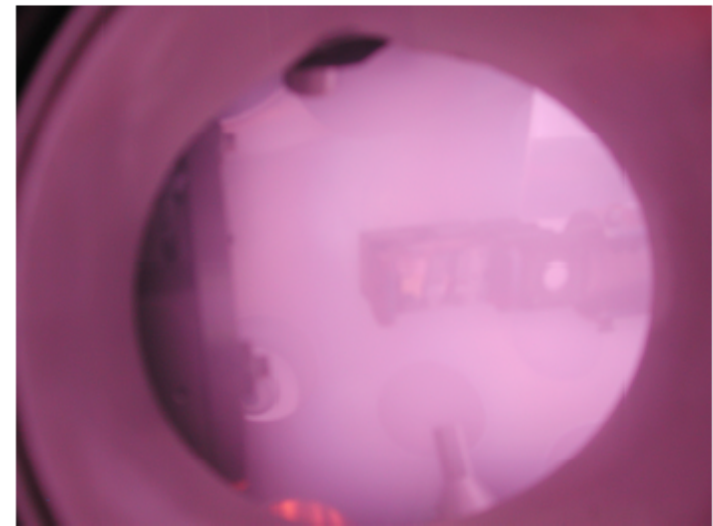
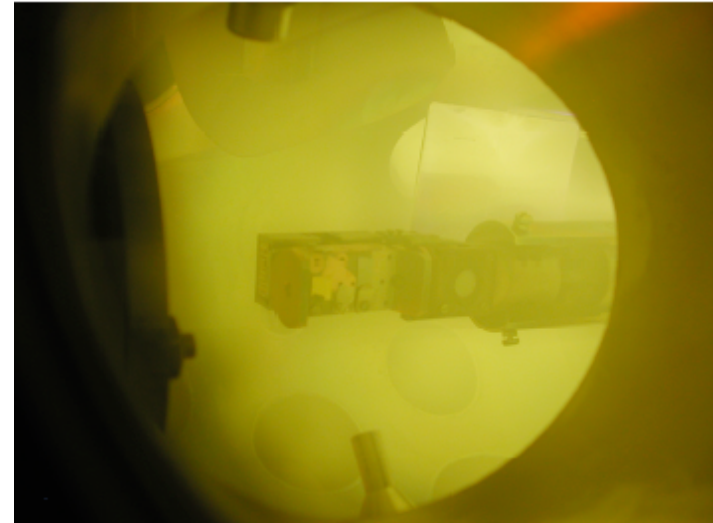
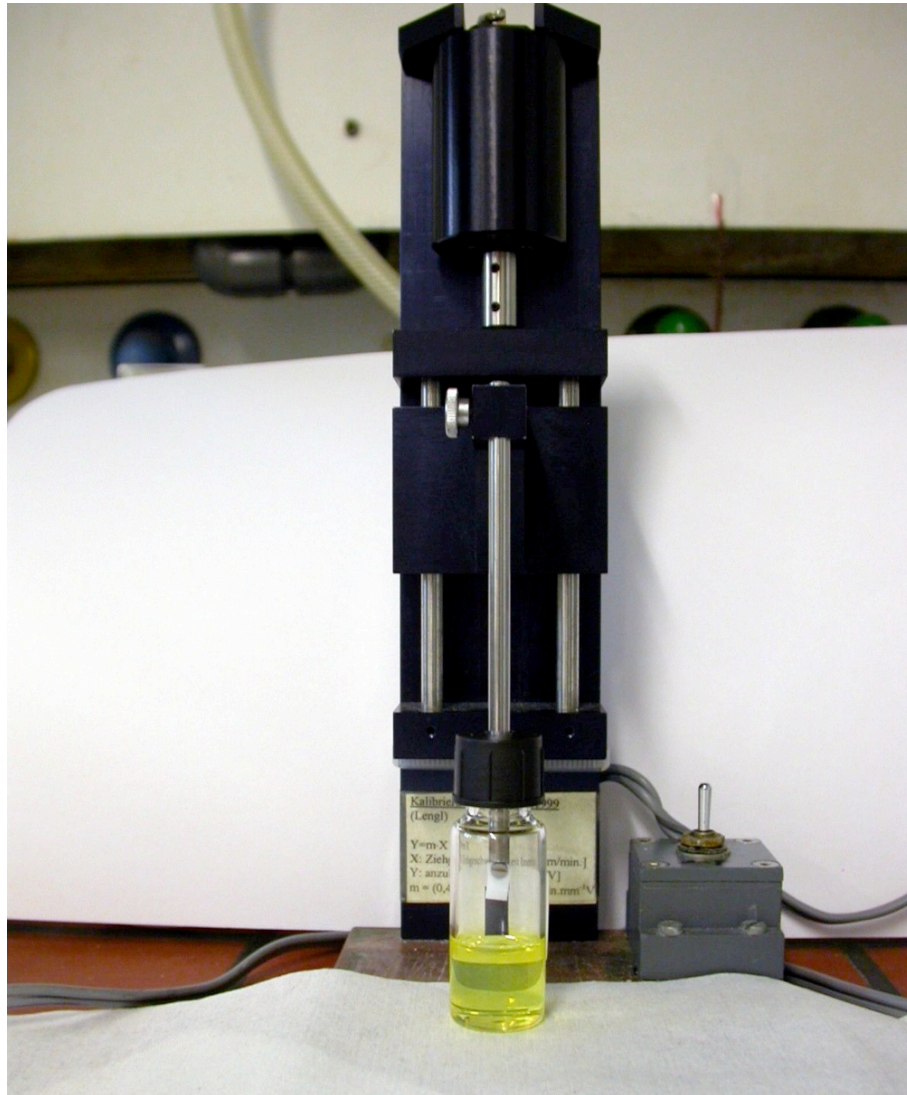
- Verfahren zum Auftragen einzelmolekularer Schichten
- Substanz mit ...
 - ... hohem Molekulargewicht
 - ... aus polaren Molekülen
 - ... wird in leicht flüchtigem Lösungsmittel gelöst



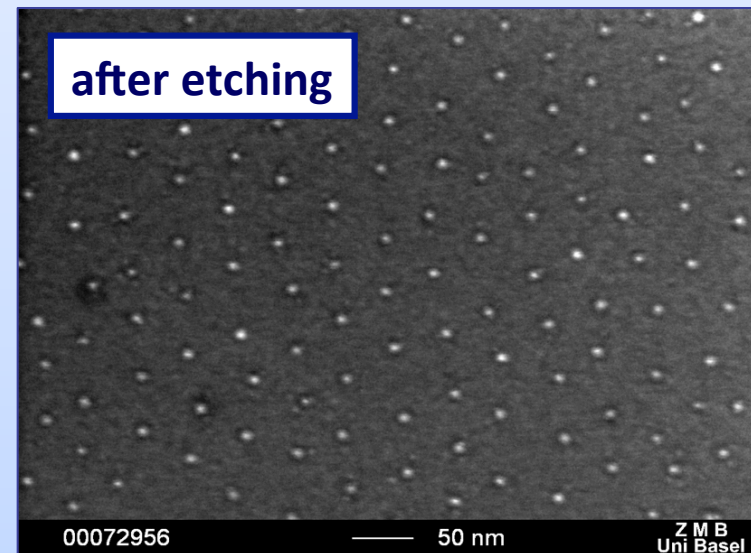
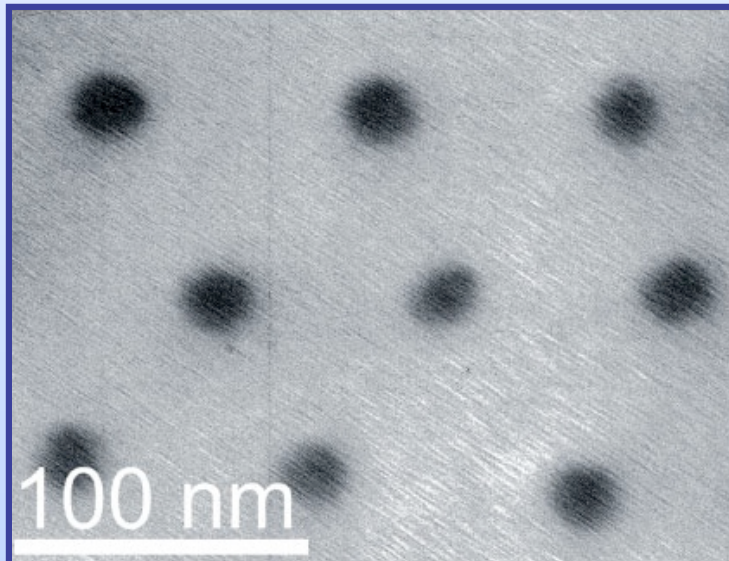
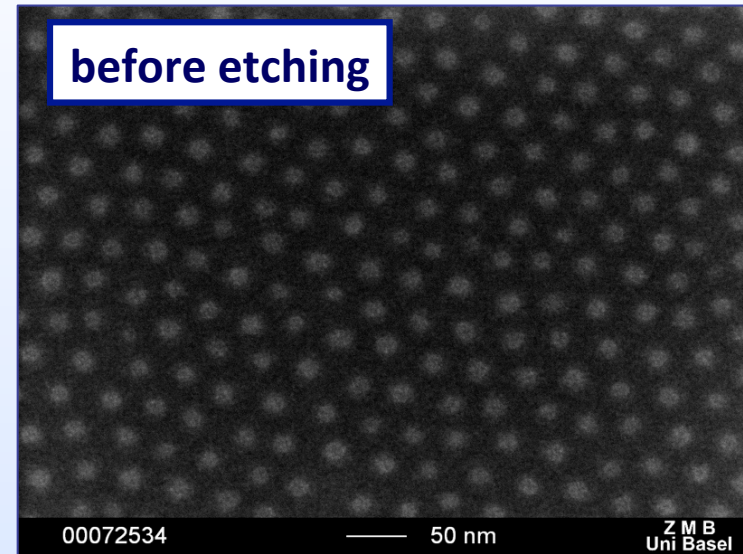
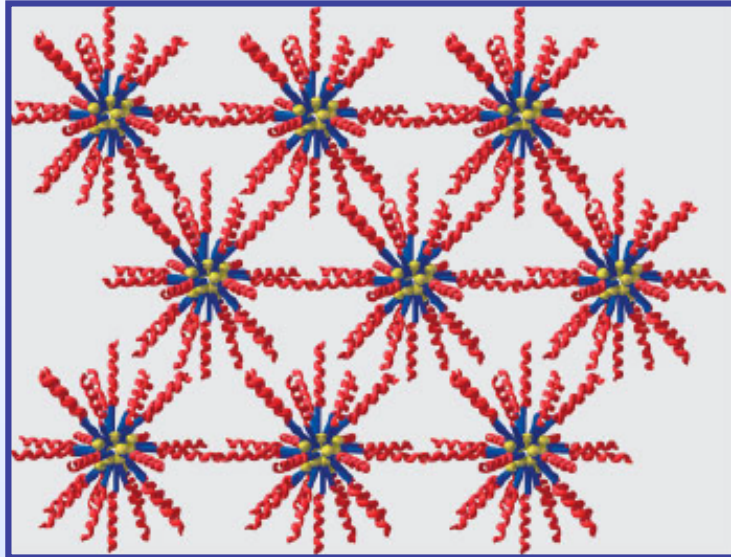
The Micellar Method



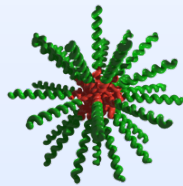
Technology



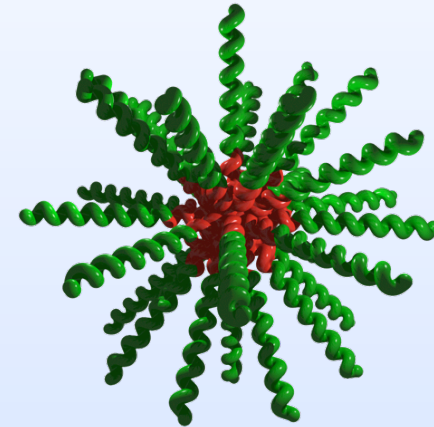
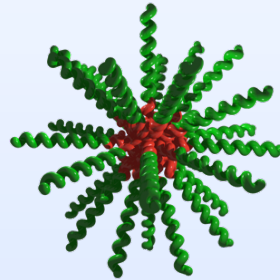
Assembly and Etching



Poly(styrene-b-2-vinyl pyridine): Size-Distance Variation



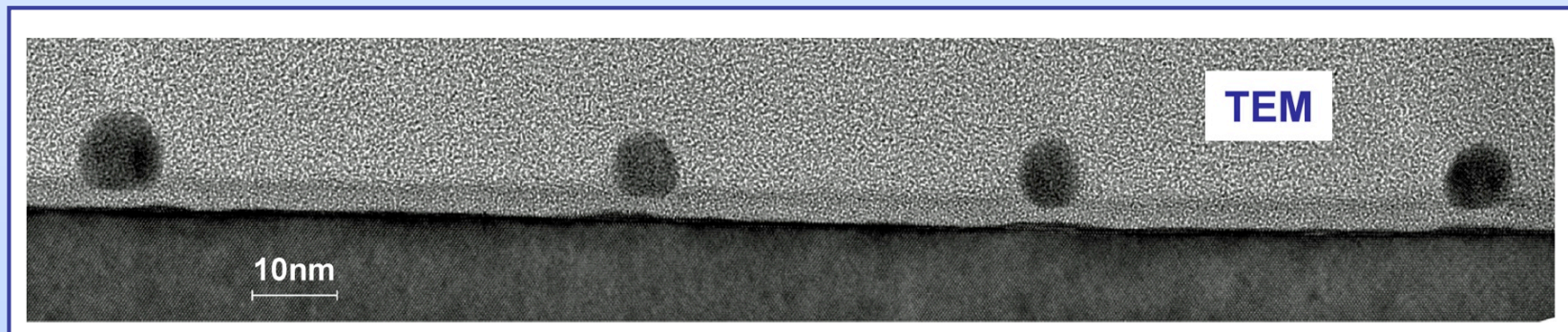
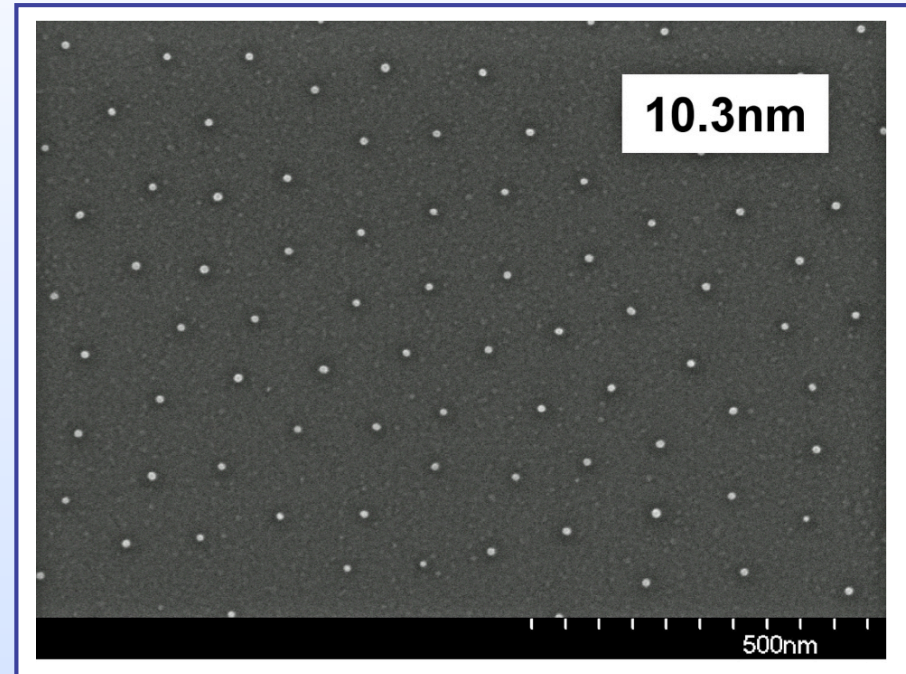
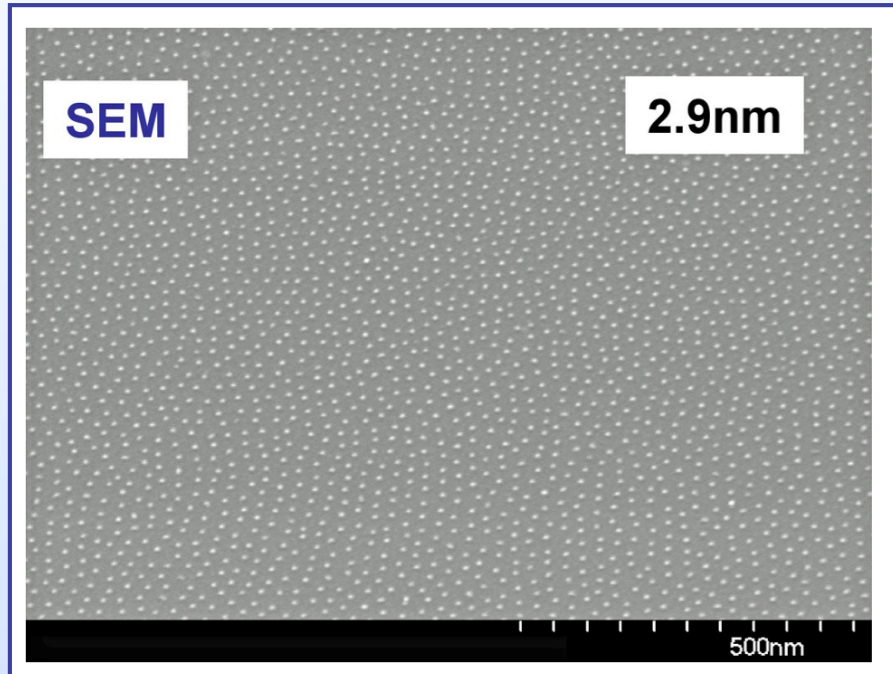
PS



P2VP

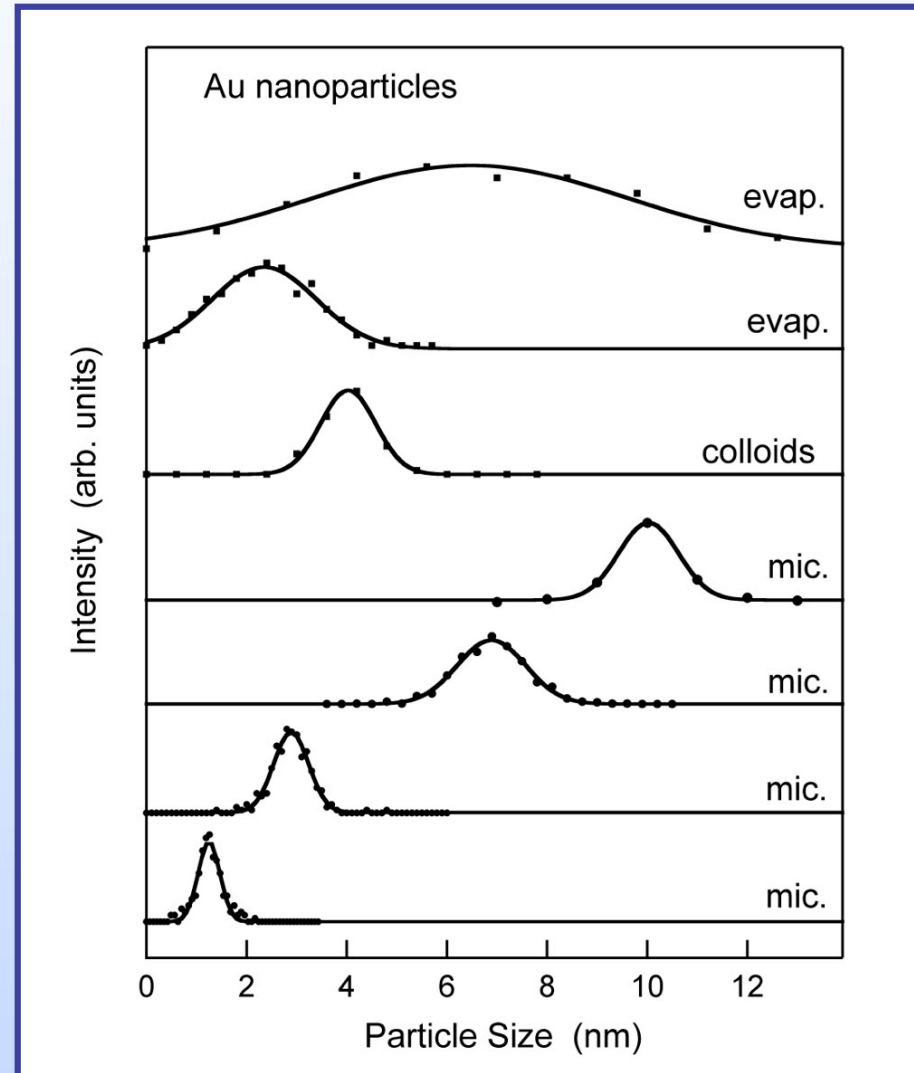
50.000	- b -	16.500
7.800	- b -	10.000
110.000	- b -	52.000
	...	

Gold Particles on Silicon Wafer

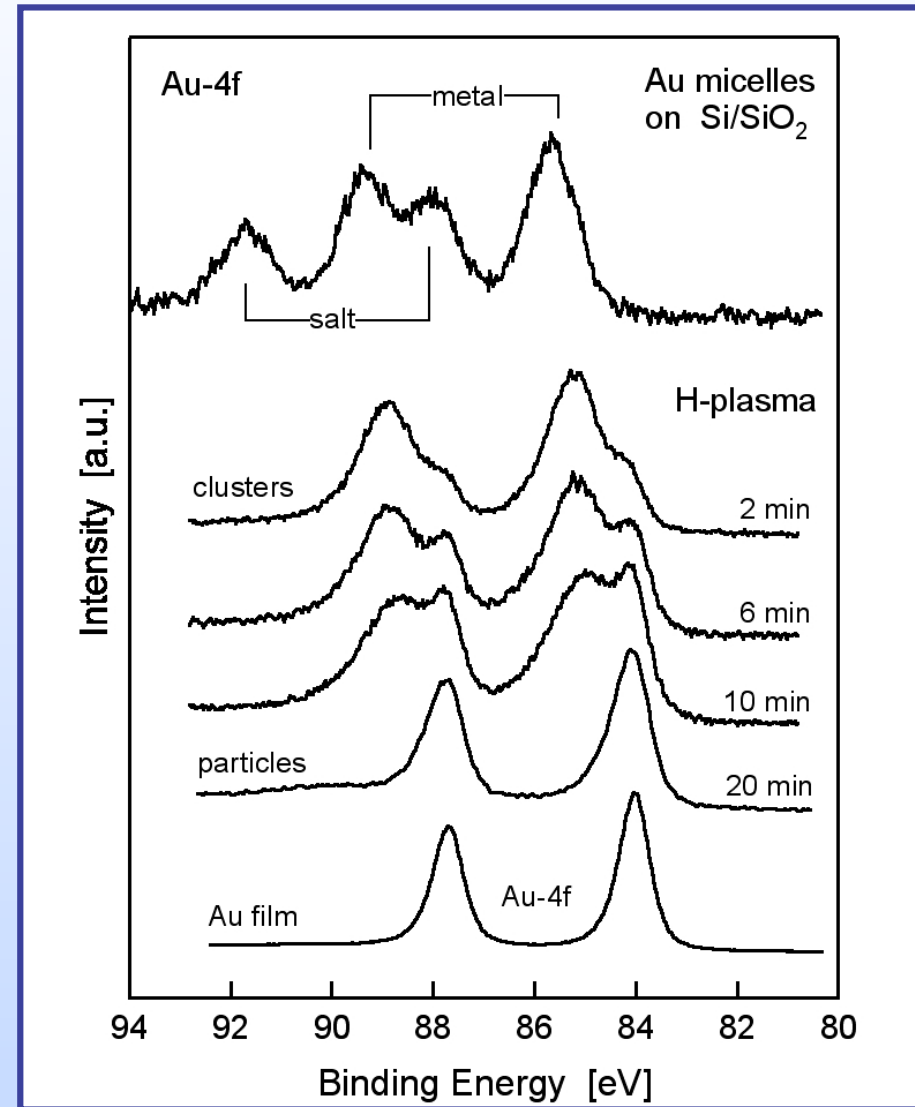
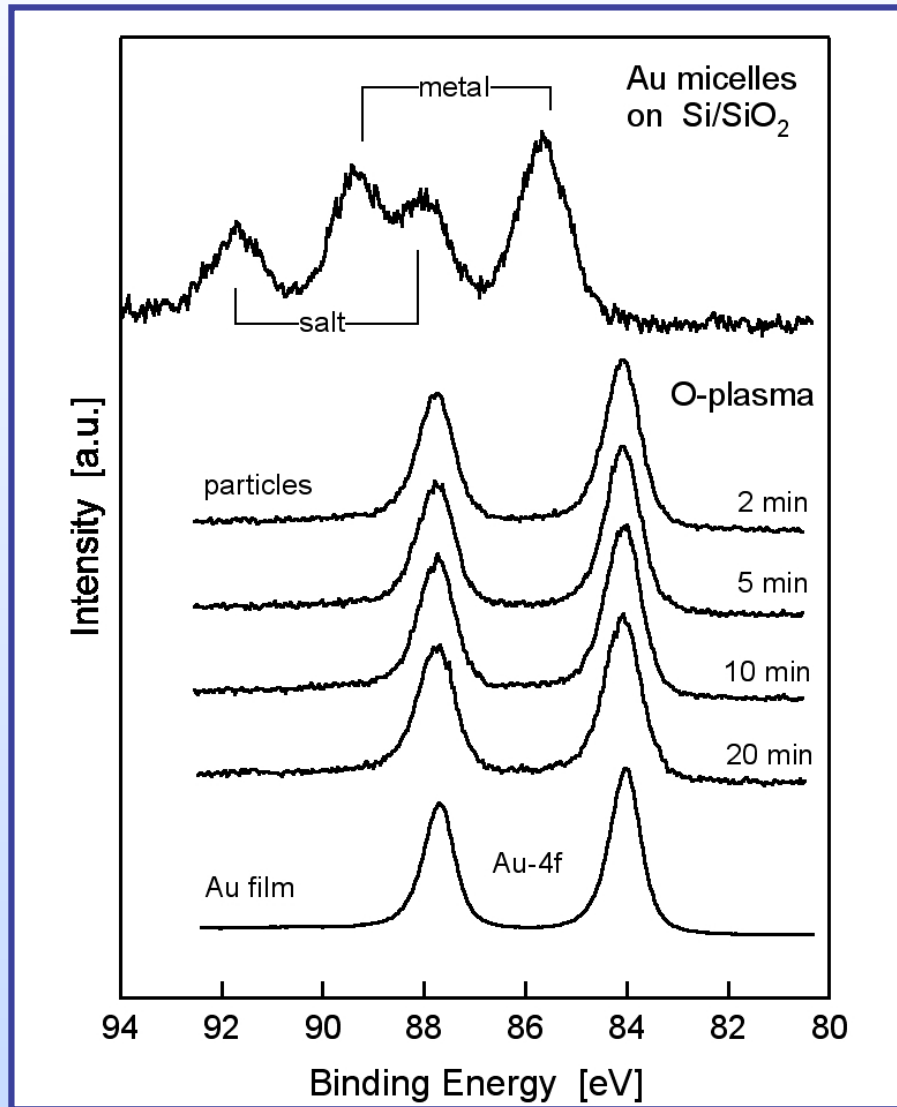


Size Distribution

- „nearly“ monodispersed
- comparable with colloidal particles
- high degree of hexagonal order

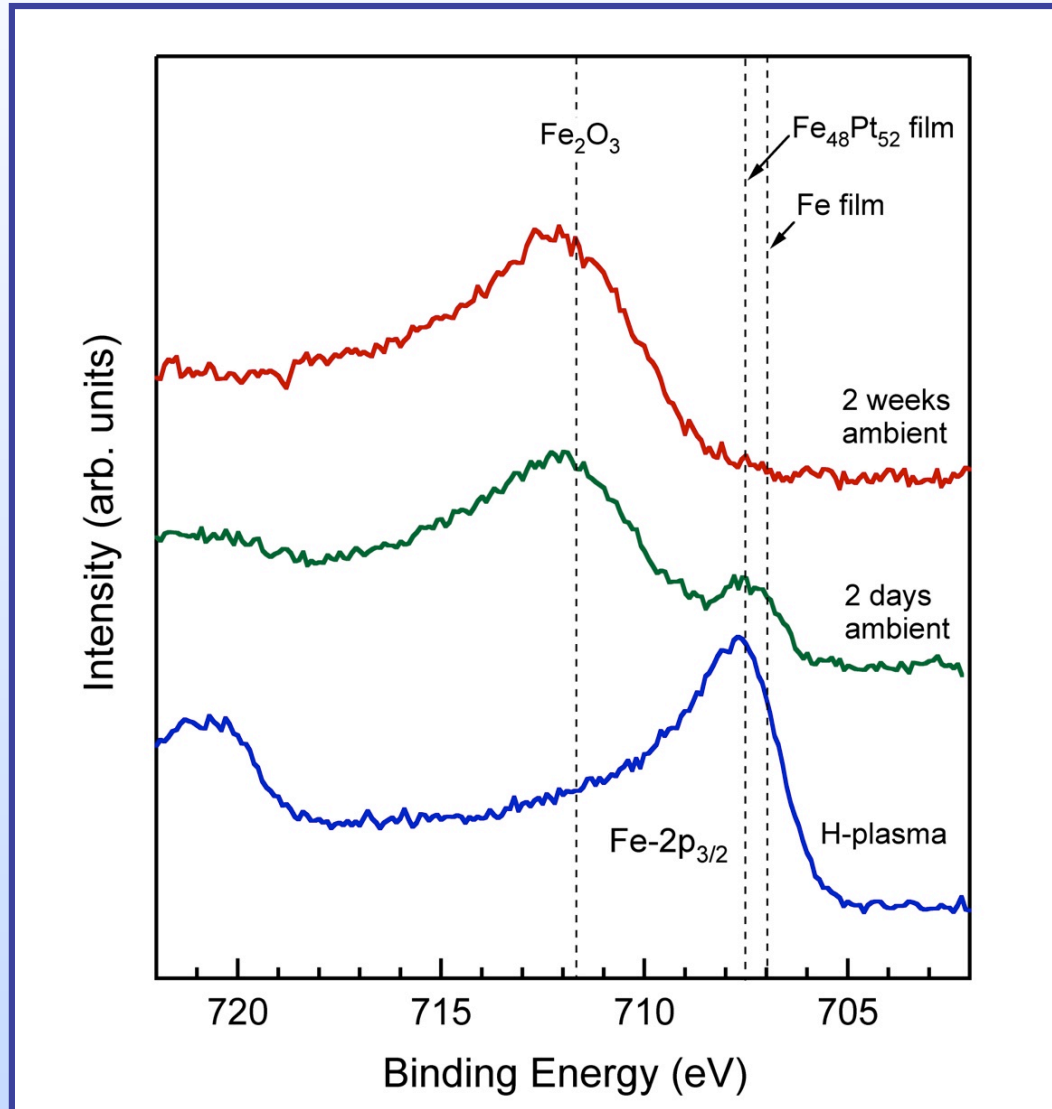
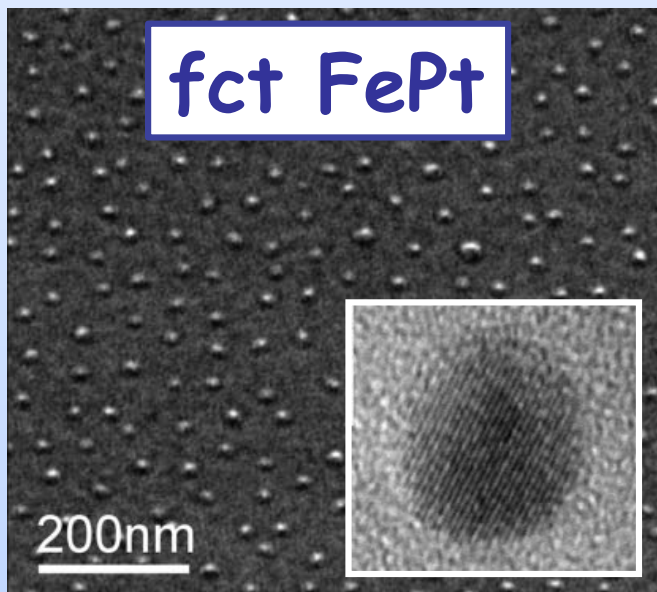
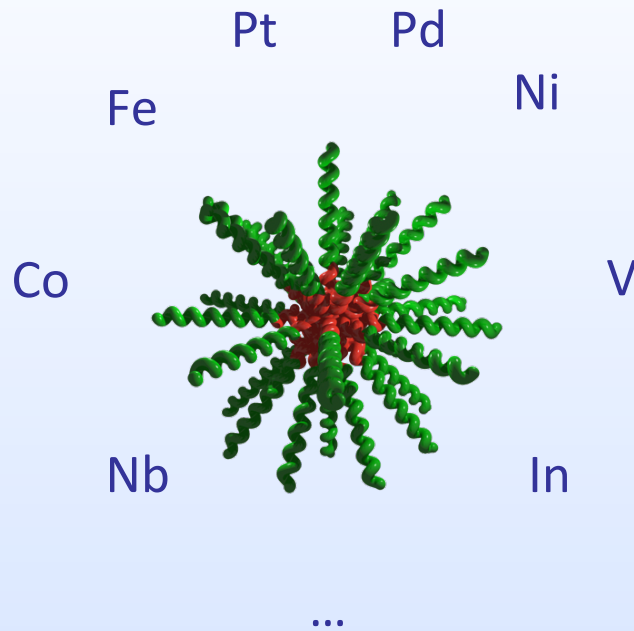


Chemical State



G. Kästle, H.-G. Boyen et al., *Advanced Functional Materials* 13 (2003) 853.

Compound Particles



A. Ethirajan, H.-G. Boyen et al., *Advanced Materials* 19 (2007) 406.