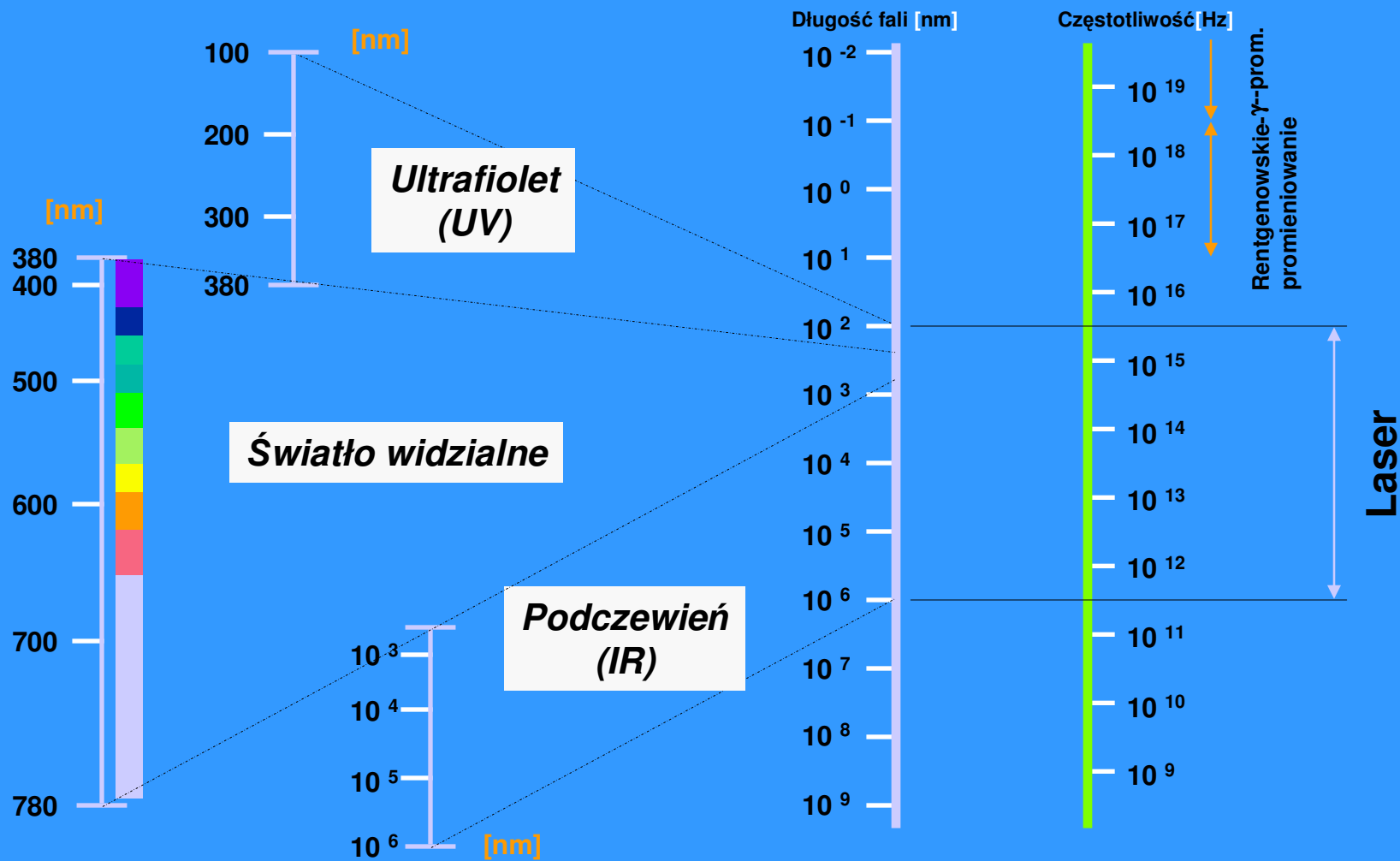
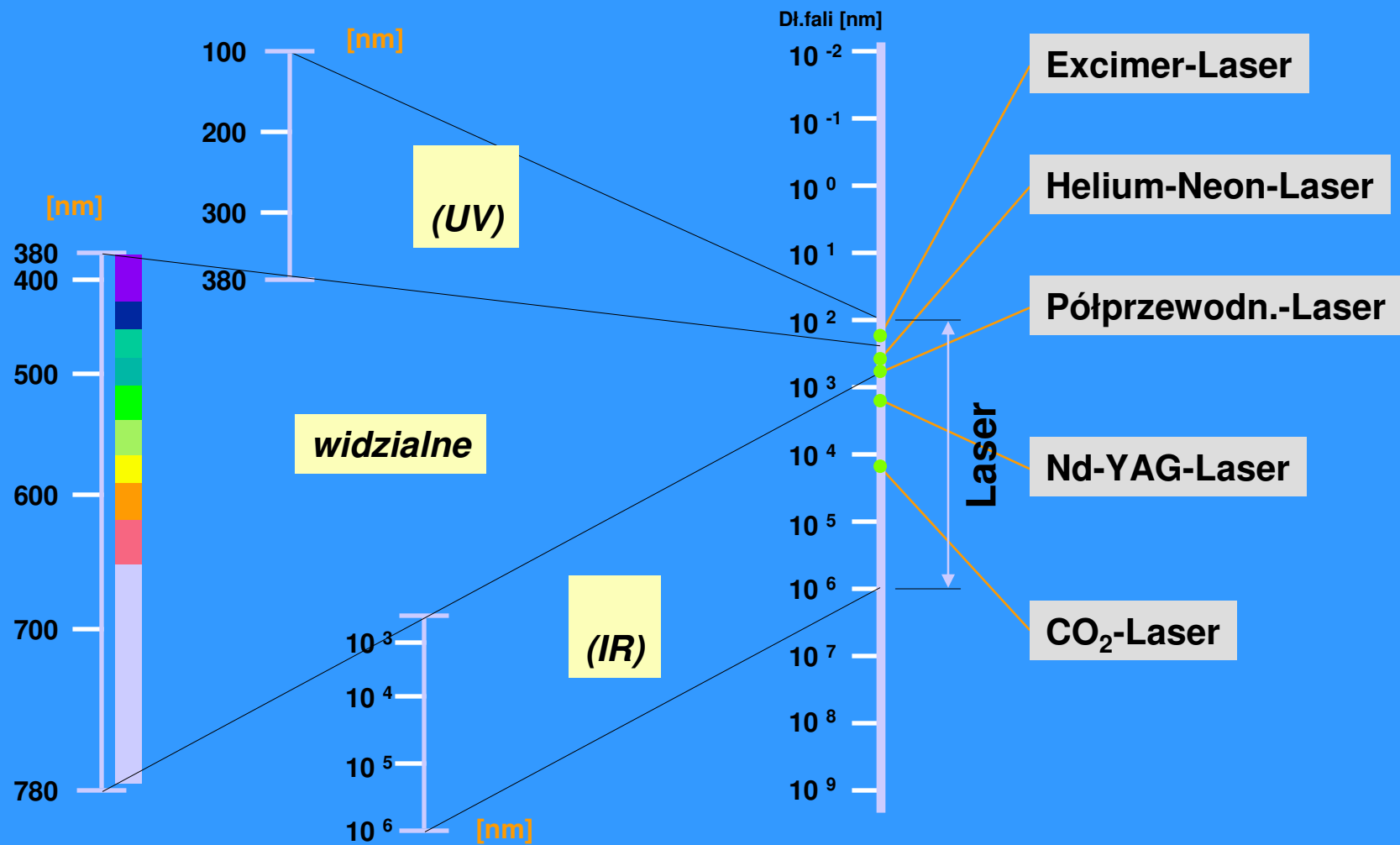


Zakres długości fal



Zakres długości fal



Oddziaływanie promieniowania laserowego

Zakres dł.fal		Oddziaływanie na oko	Oddziaływanie na skórę
100-315 nm	UV	Zapalenie rogówki	Poparzenie, przyspieszenie starzenia Excimer-Laser
315-380 nm		Mętnienie soczewki	Wzmocnienie pigmentu He-Ne-Laser
380-780 nm	Widz.	Uszkodzenie siatkówki	Ciemnienie pigmentu, zapalenie
780-1400 nm	IR	Mętnienie soczewki, uszkodzenie siatkówki	Nd-YAG-Laser Diodowy laser dużej mocy
1400-3000 nm		Mętnienie soczewki, zapalenie rogówki	Zapalenie
3000-100000 nm		Zapalenie rogówki	CO ₂ -Laser

Oddziaływanie impulsów laserowych

Mechanizm niszczenia przy impulsach laserowych (wysokie energie i moce)

Czas oddziaływ.	Rodzaj impulsu	Mechanizm niszczenia
krótszy niż 10^{-9} s	Mody sprzężone	Przebicie elektryczne
10^{-9} do 10^{-1} s	Impulsy gigantyczne	Akustyczna fala uderzeniowa, Odparowanie, Procesy termiczne
0,1 do 10 s	Laser impulsowy, powyżej 0,25 s laser liniowy	Procesy termiczne
dłuższy niż 10 s	Laser liniowy	Procesy termiczne, Procesy fotochemiczne

Absorpcja światła laserowego

Promieniowanie laserowe rozprzestrzeniając się w różnych ośrodkach podlega prawom odbicia, załamania, polaryzacji i pochłaniania

Gdy promieniowanie monochromatyczne, tworzące równoległą wiązkę przechodzi przez ośrodek pochłaniający, jego natężenie maleje w miarę przenikania promieniowania wгłęb, a zmianę natężenia promieniowania opisuje prawo Lamberta

$$I = I_0 e^{-\alpha x}$$

I_0 , I – natężenia początkowe i po przebyciu warstwy o grubości x

α - współczynnik absorpcji promieniowania w ośrodku zależny od długości fali

W wyniku absorpcji, energia elektromagnetyczna wiązki laserowej przekształca się w energię elektryczną, cieplną, chemiczną i mechaniczną

Mechanizmy absorpcji promieniowania laserowego

- **Mechanizm klasyczny**

od długości fali $\lambda = 10,06 \mu\text{m}$ do $\lambda = 0,53 \mu\text{m}$ /druga harmoniczna lasera Nd:YAG/

Zwany „inversebremsstrahlung” – proces odwrotny do procesu hamowania elektronów

/promieniowanie hamowania - w wyniku hamowania elektronu w polu jądra atomowego elektron generuje promieniowanie elektromagnetyczne EM/

Klasyczny mechanizm absorpcji powoduje przyśpieszenie elektronów w polu EM fali promieniowania laserowego, elektrony zderzają się z atomami jonizując je, a następnie uciekają z obszaru plazmy tworząc pole elektryczne przyśpieszające podążające za elektronami jony; występuje grzanie peryferyjnych obszarów ogniska plazmowego do stosunkowo wysokich temperatur, w wyniku czego następuje topienie i parowanie dużej ilości materiału

Aby zapoczątkować klasyczny mechanizm absorpcji, potrzebne są swobodne elektrony; muszą zostać one uwolnione w procesie absorpcji wielofotonowej

- **Absorpcja wielofotonowa**

dla małych długości fali np. lasery ekscymerowe:

$\lambda = 248 \text{ nm}$ (KrF) ;

$\lambda = 193 \text{ nm}$ (ArF);

$\lambda = 157 \text{ nm}$ (F₂)

dla laserów pracujących z krótkimi nanosekundowymi (10^{-9}s),
pikosekundowymi (10^{-12}s) lub femtosekundowymi (10^{-15}) impulsami
(*lasery ekscymerowe lub CO₂ i Nd:YAG z modulatorem dobroci Q-switch*)

Występuje gdy energia kwantów promieniowania laserowego jest duża –
ablacja laserowa

proces jest atermiczny – temperatura wytworzonej plazmy jest niższa niż
w przypadku laserów długofalowych – pozwala osadzać na podłożach
termicznie czułych

Ablacja – proces, w którym wysokoenergetyczne kwanty promieniowania
laserowego wywołują obniżenie energii wiązań pomiędzy cząstkami,
co umożliwia zdejmowanie warstw atomowych jedna po drugiej

Klasyfikacja powierzchniowej obróbki laserowej

nagrzewanie



wyżarzanie
hartowanie

przetapianie



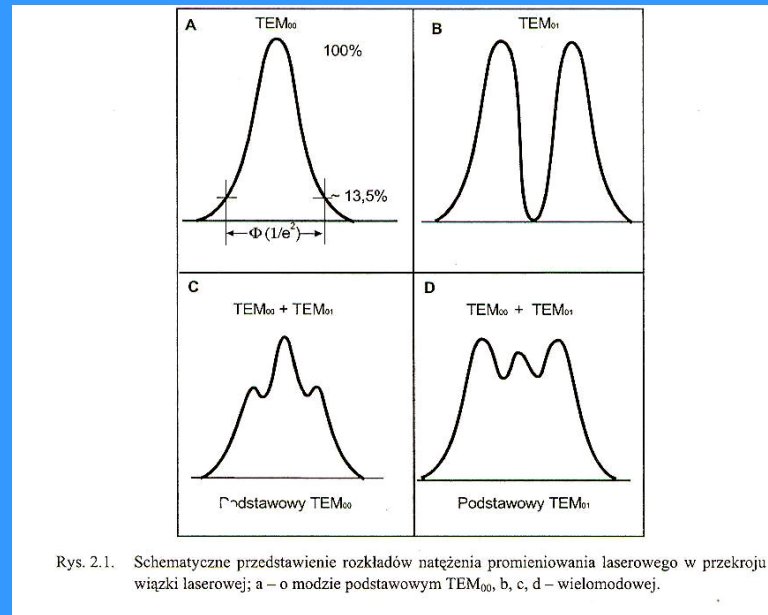
wzbogacanie powierzchniowe
warstwy szkliste
platerowanie
hartowanie przetopieniowe

szok termiczny

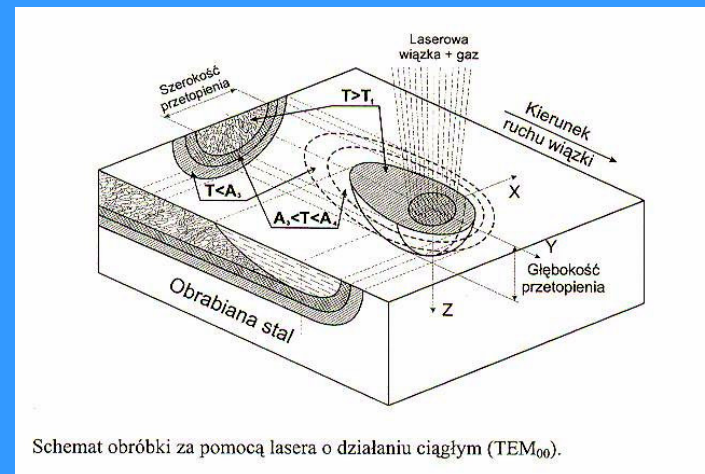
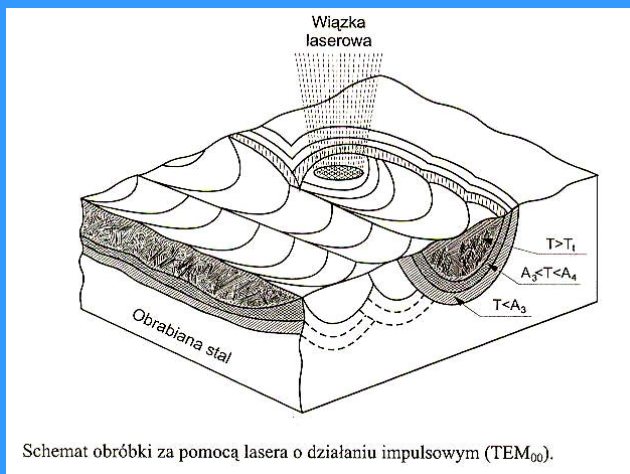


utwardzanie
udarowe

- Nagrzewanie materiałów za pomocą promieniowania laserowego (Kus.2.1)

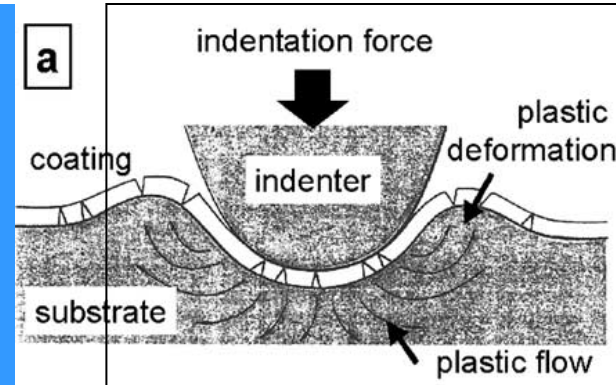
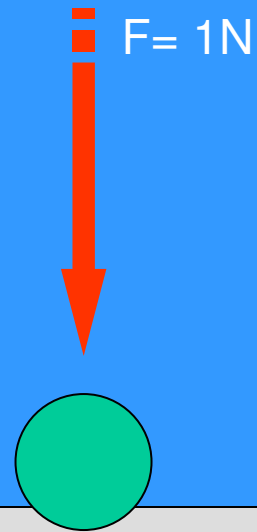


- Laserowa obróbka cieplna (Kus.2.2 , 2.3)

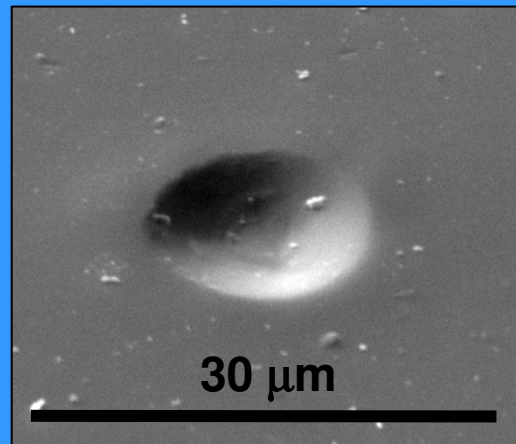
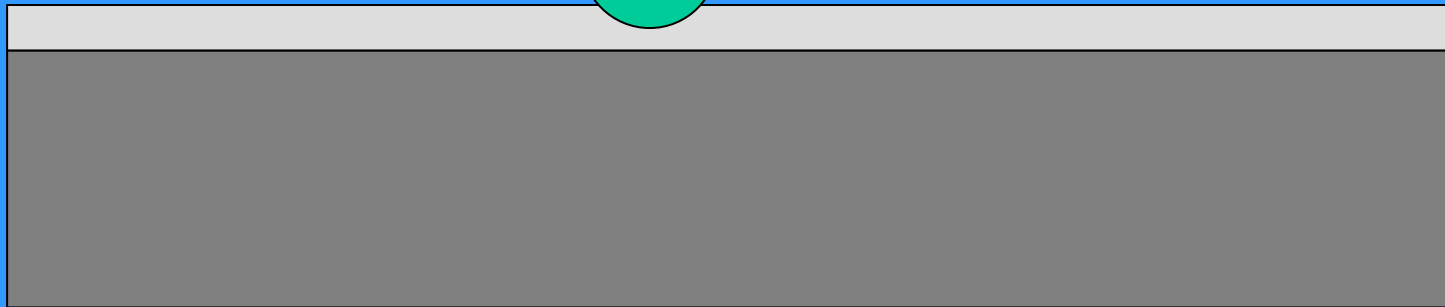


Wear test

(ball pushed into the coating)



H. Jehn, G. Reiners, N. Siegel, in: DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Ed.), Charakterisierung dünner Schichten, DINFachbericht, vol. 39, Beuth-Verlag GmbH, Berlin, 1993

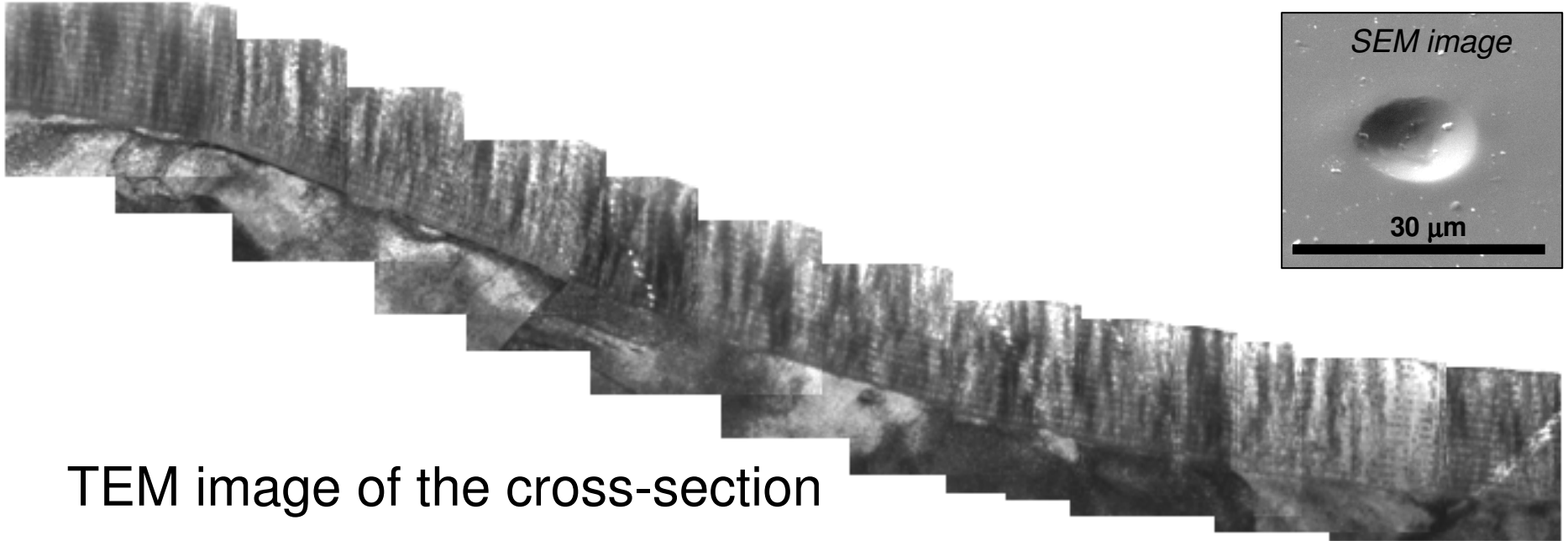


SEM image of the coating surface after mechanical test



32 layered Ti/TiN coating

Cross- section of the place where penetrator was pushed into the coating



I. as-deposited mono-layer coating

Coating surface

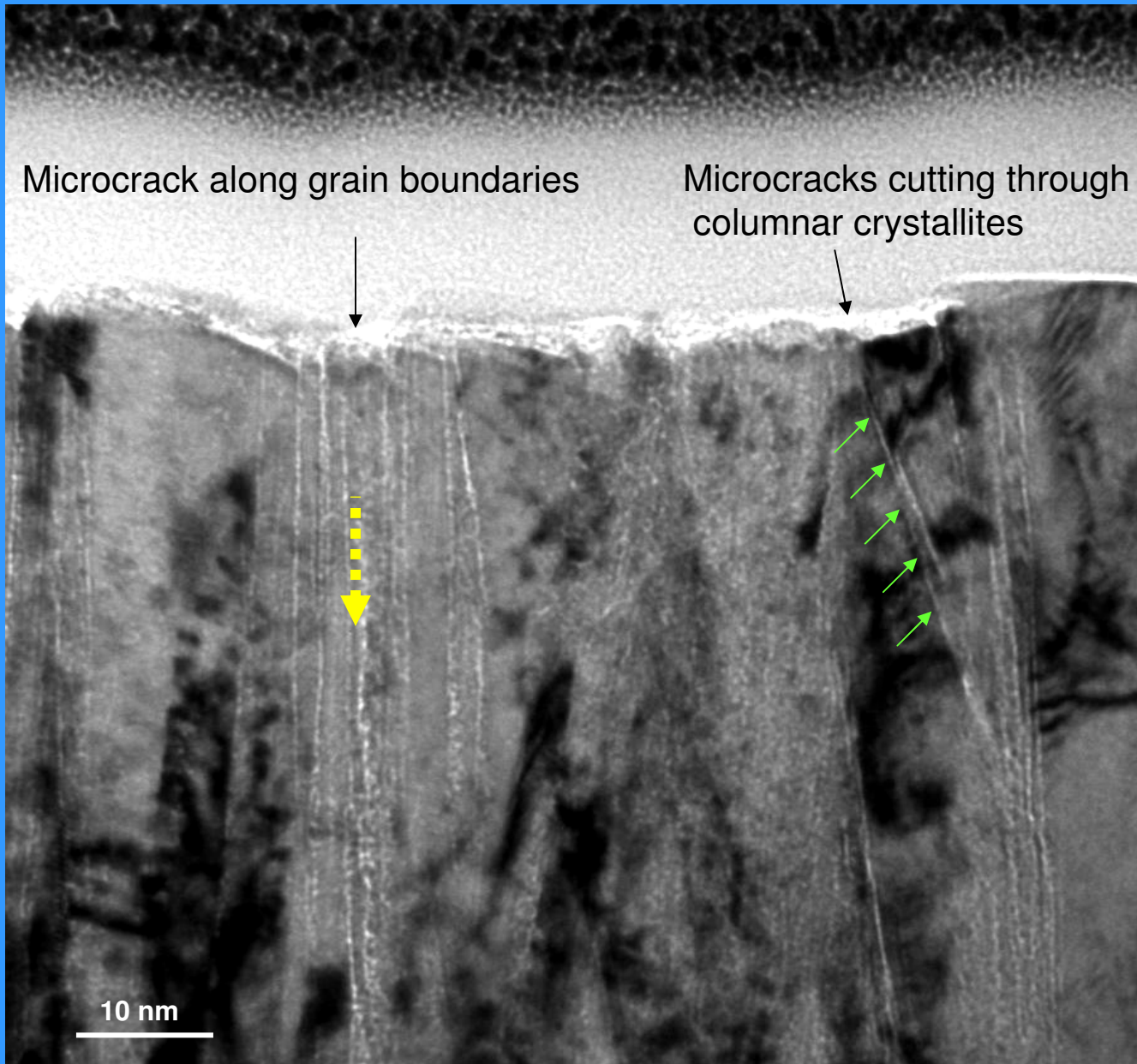
TiN coating



TEM image of the cross-section

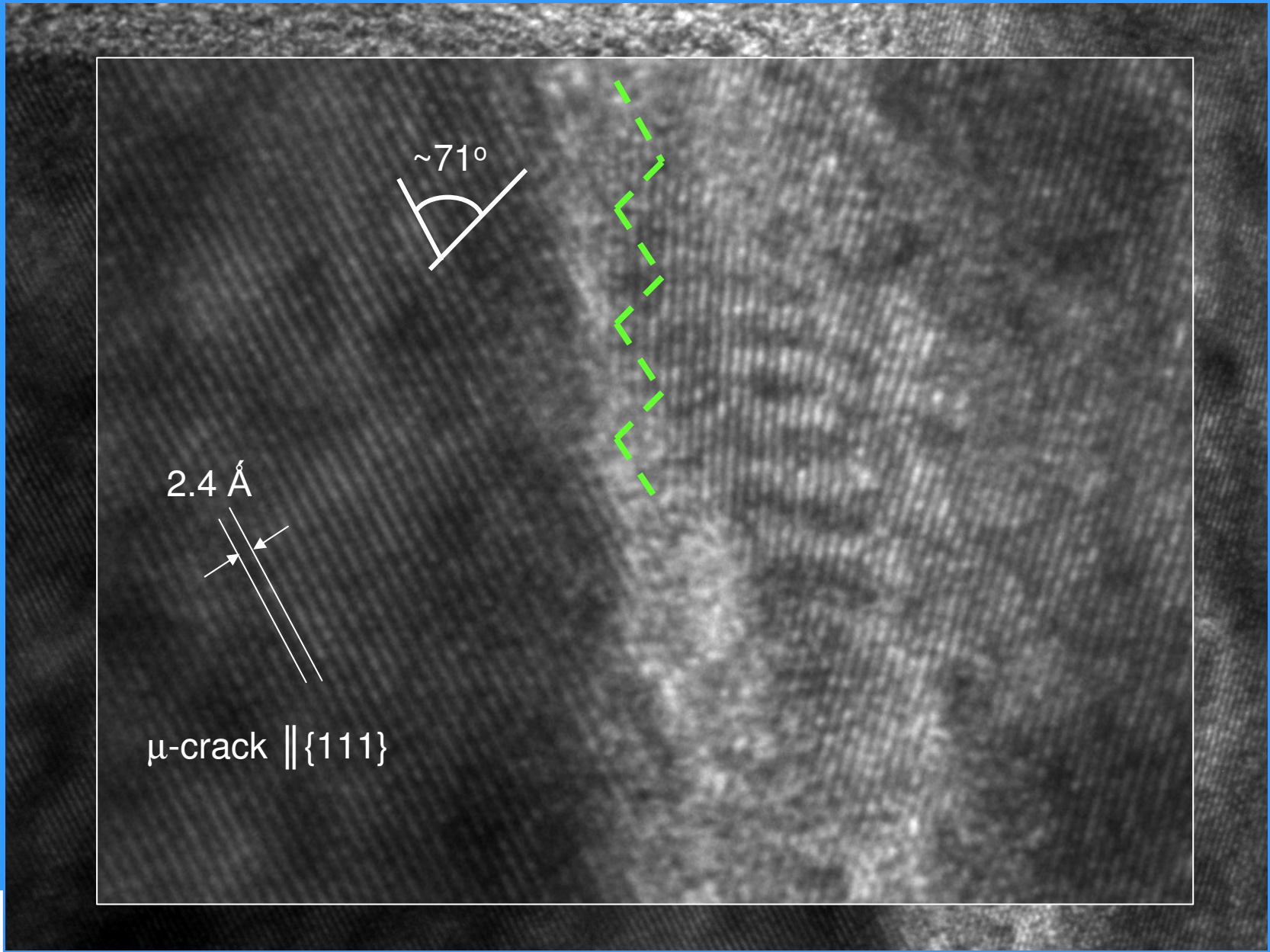
Single layered coating- low loading (0.25N)

TiN coating



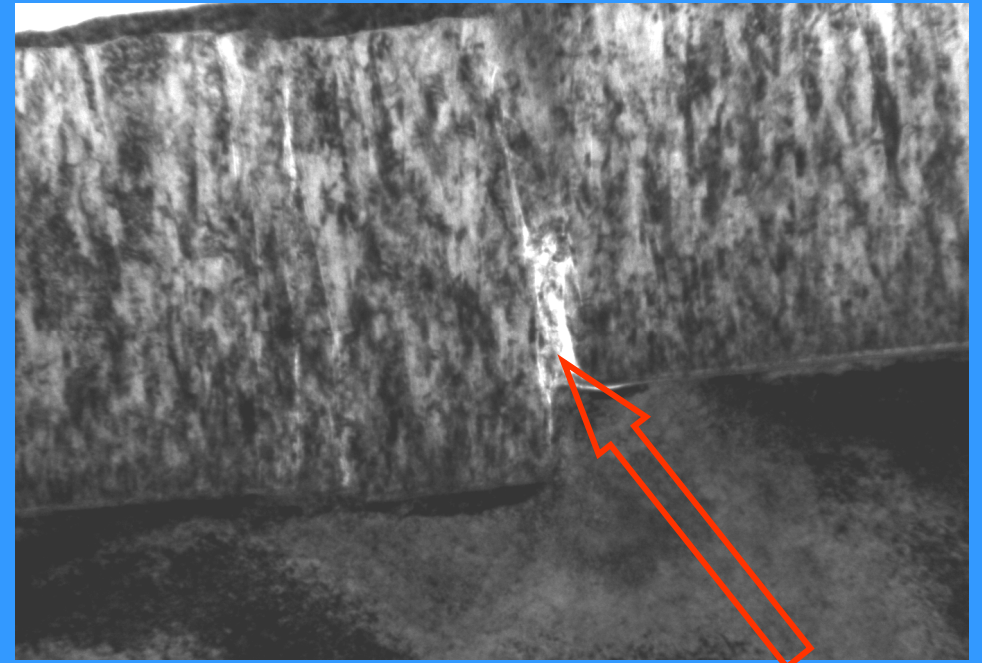
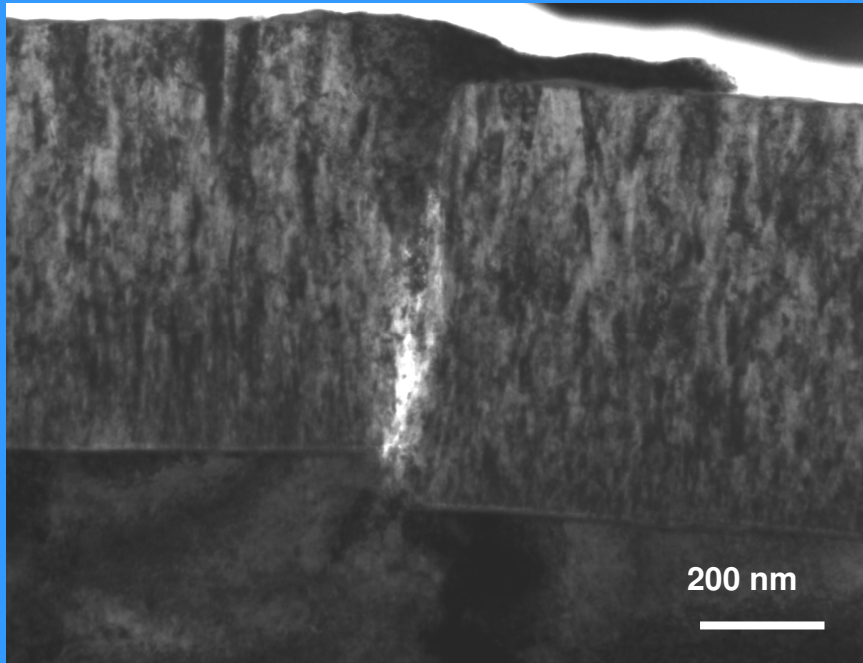
TEM image of the cross-section





HREM image of the crack at the cross-section

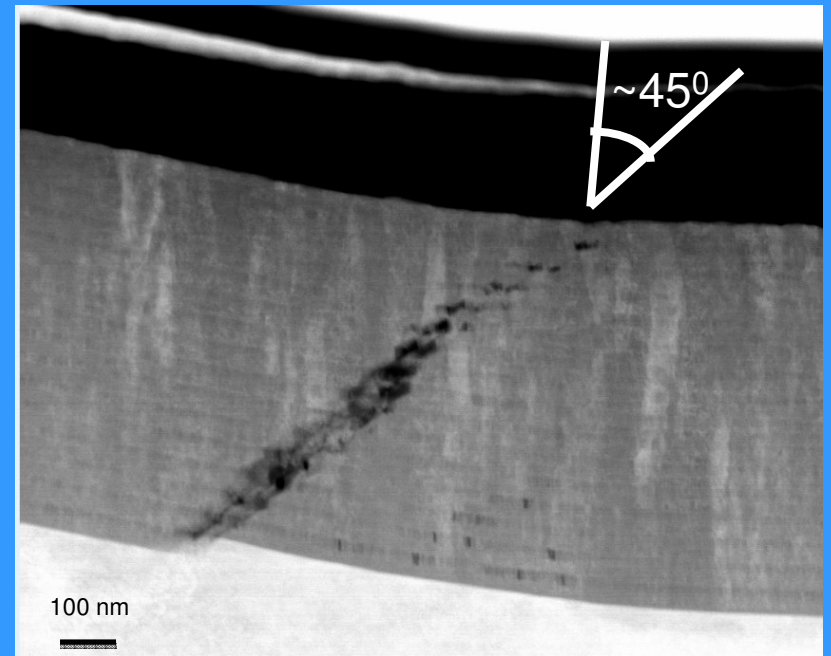
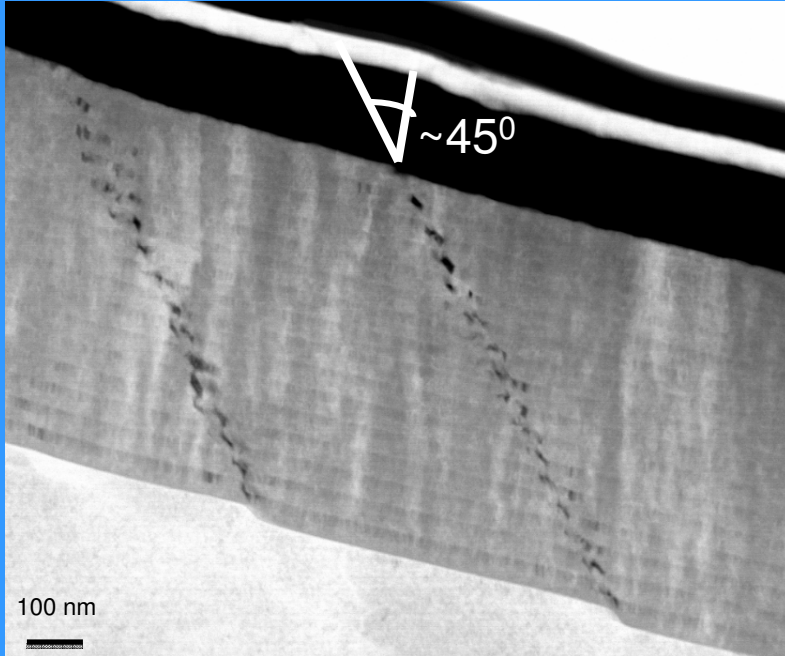
Single layered coating- high loading (1N)



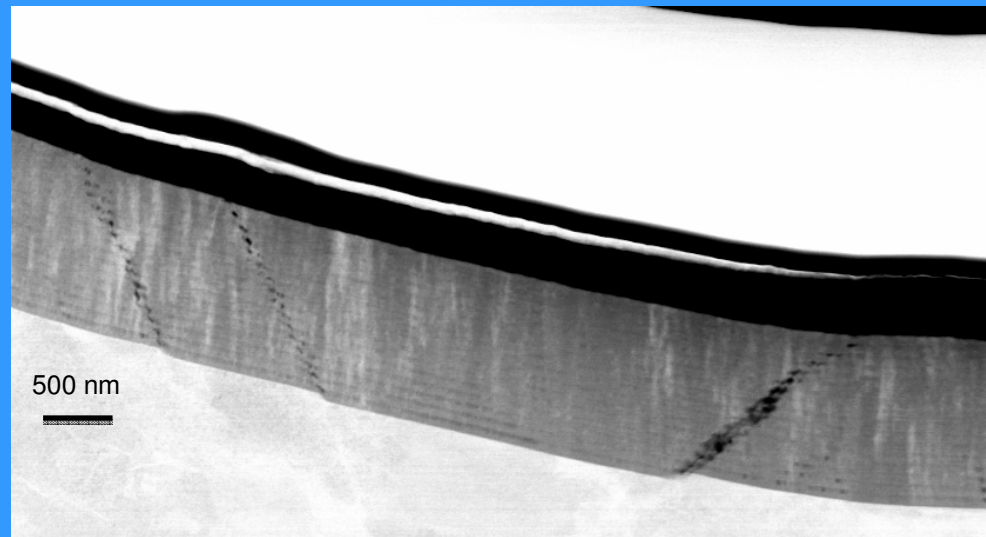
Area endangered by corrosion
Substrate has a contact with outside environment

TEM image of the cross-section

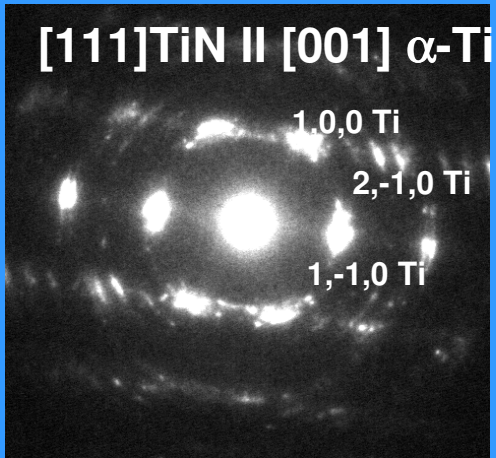
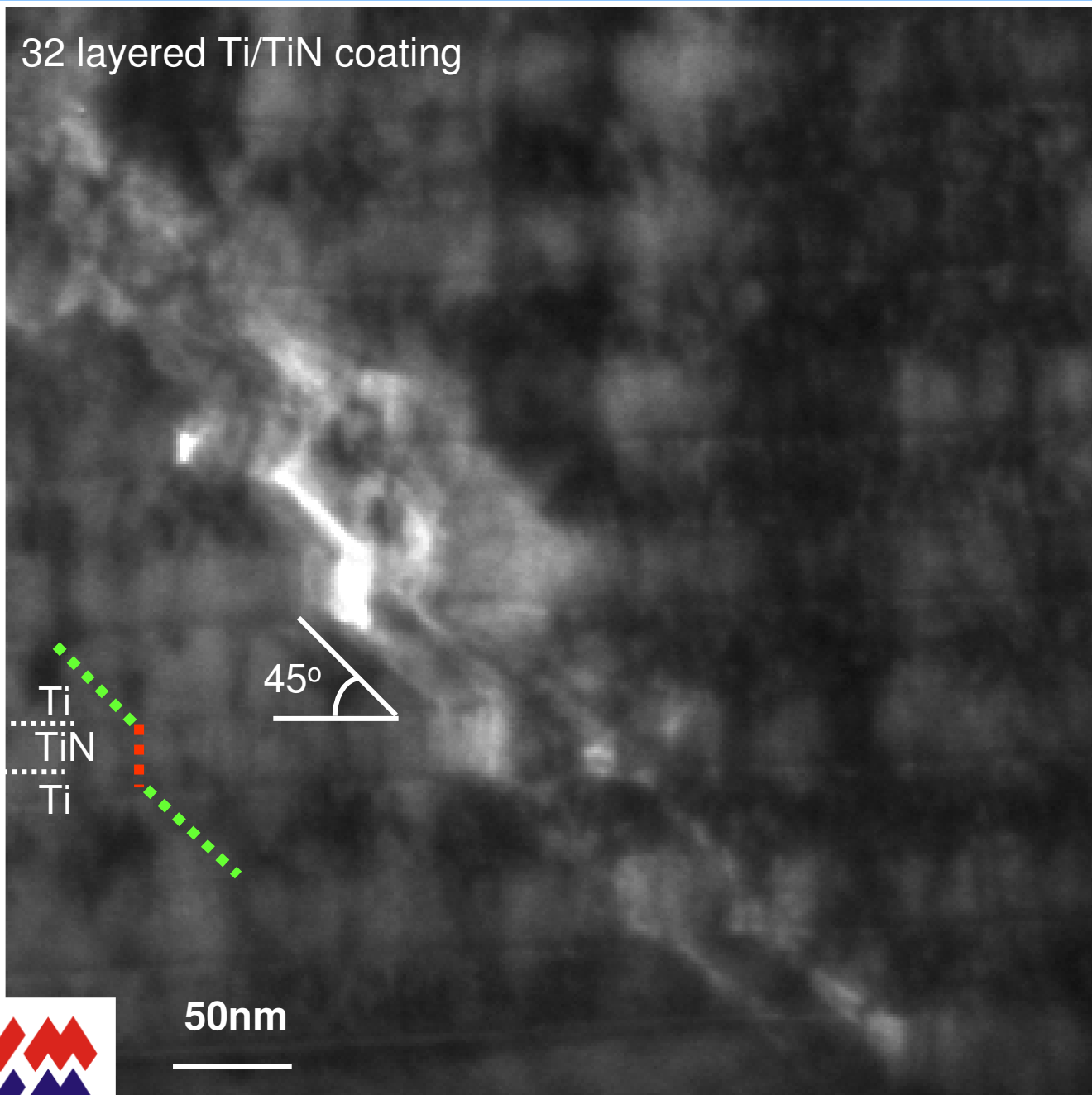
32 layered Ti/TiN coating ratio 1:1



STEM images of cracks propagating across the coating under applied load



32 layered Ti/TiN coating



Zone [001]

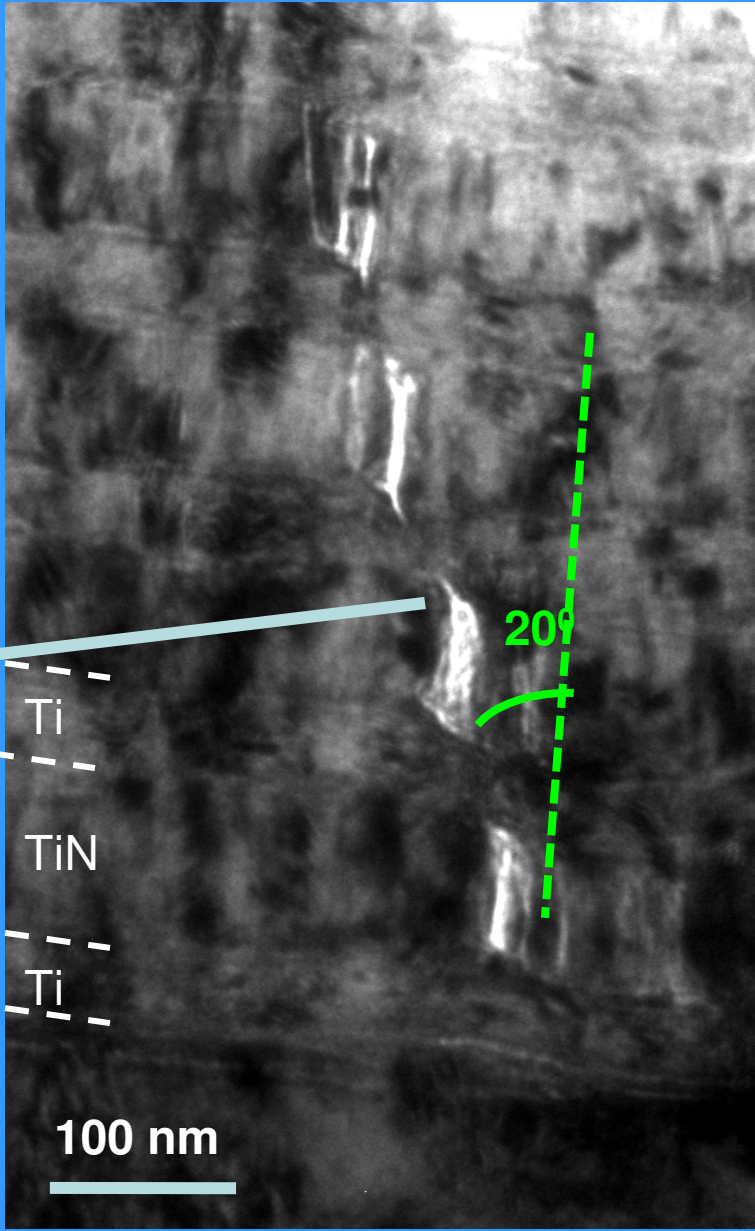
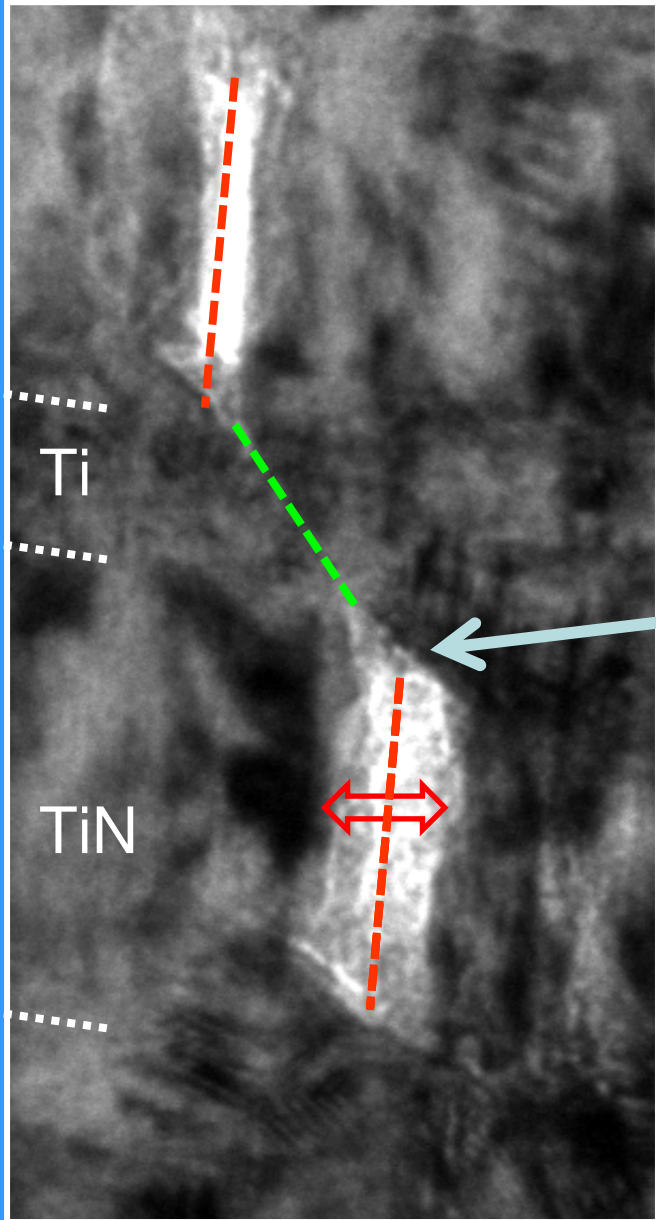
Local plastic deformation
(slip systems)
/cracking



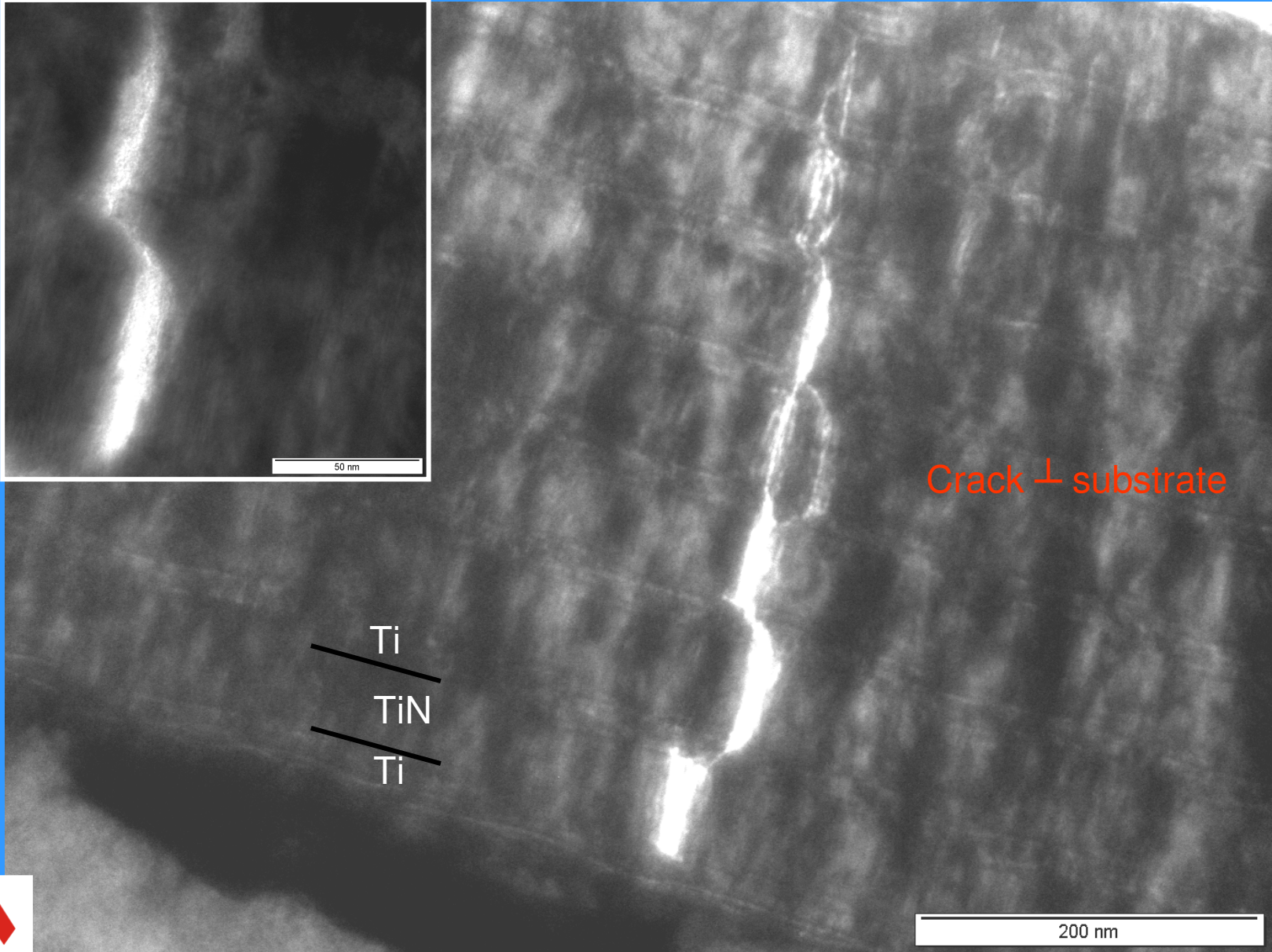
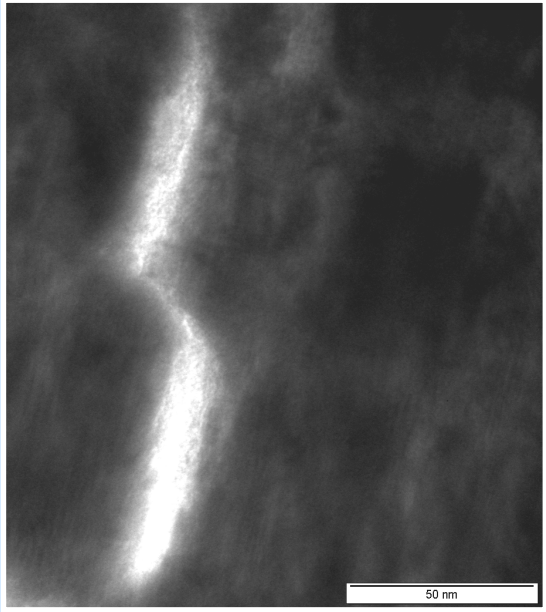
50nm

TEM image of the cross-section

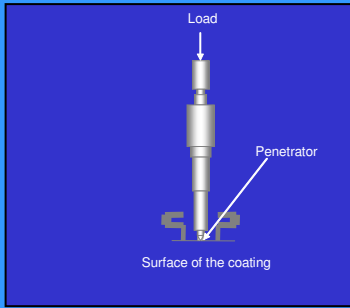
Ratio 1:2 8 x Ti:TiN



Ratio 1:4 8 x Ti:TiN

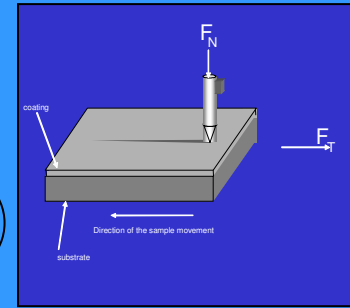


Analysis of mechanical properties



hardness

Type of penetrator: Vickers 136°
load : 0.02- 30N

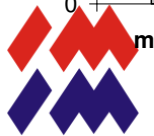
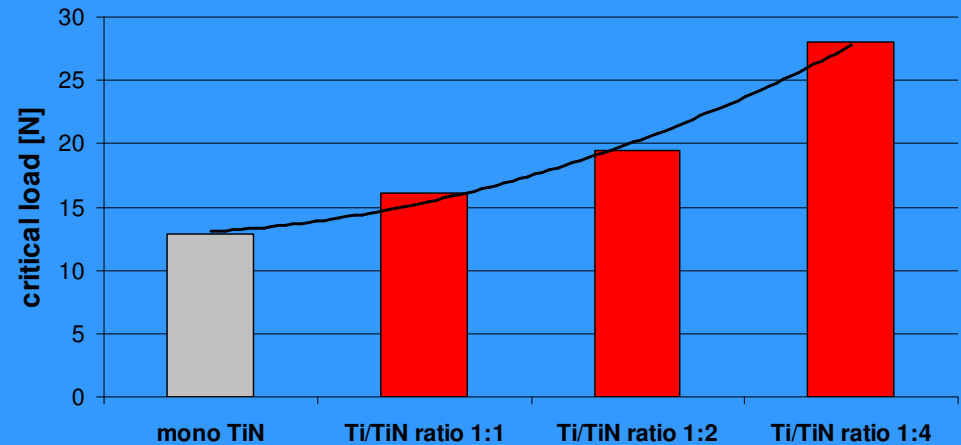
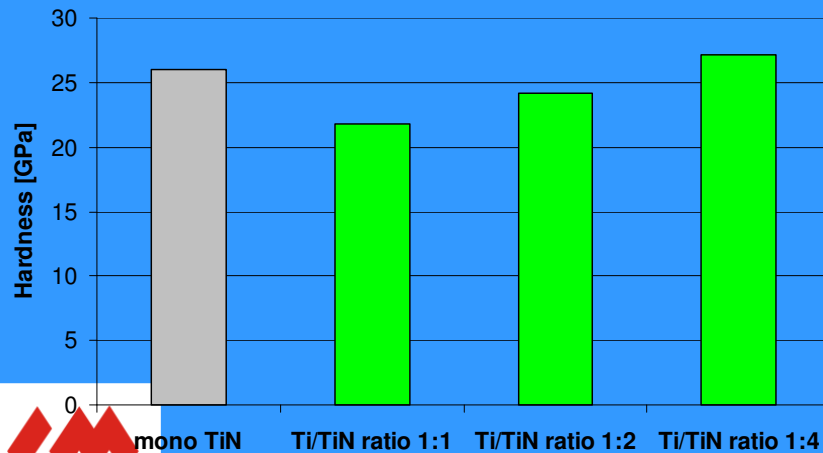


scratch

Type of penetrator: Rockwell 120°
load : 0.05- 30N
speed : 0.4- 20mm/min
length of scratch : up to 20 mm

H [GPa]	Number of layers		Hardness	
8x(Ti+TiN)	E		10mN	deviation
TiN- mono			26	1.40
ratio 1-1	16	247	21.74	1.40
ratio 1-2	16	255	24.14	1.90
ratio 1-4	16	263	27.12	2.10

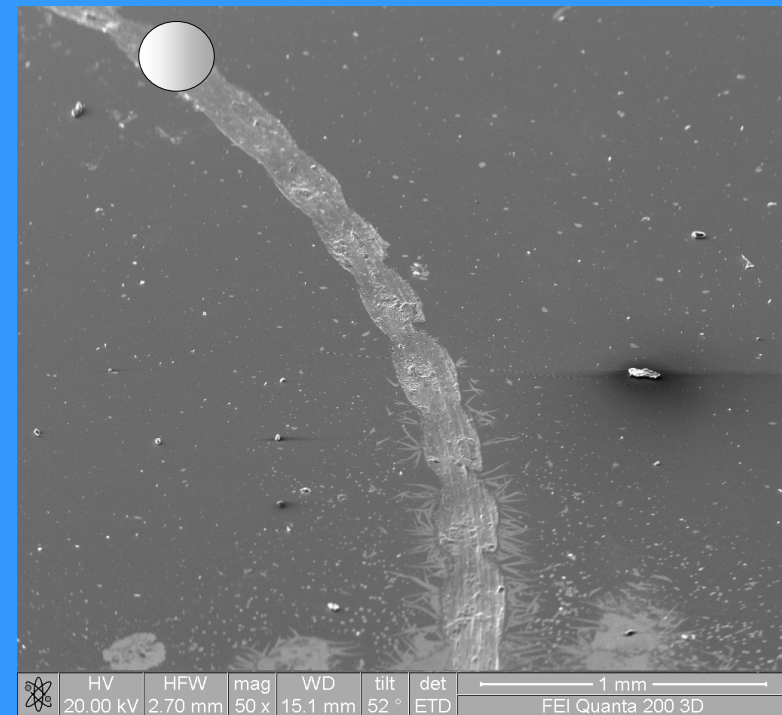
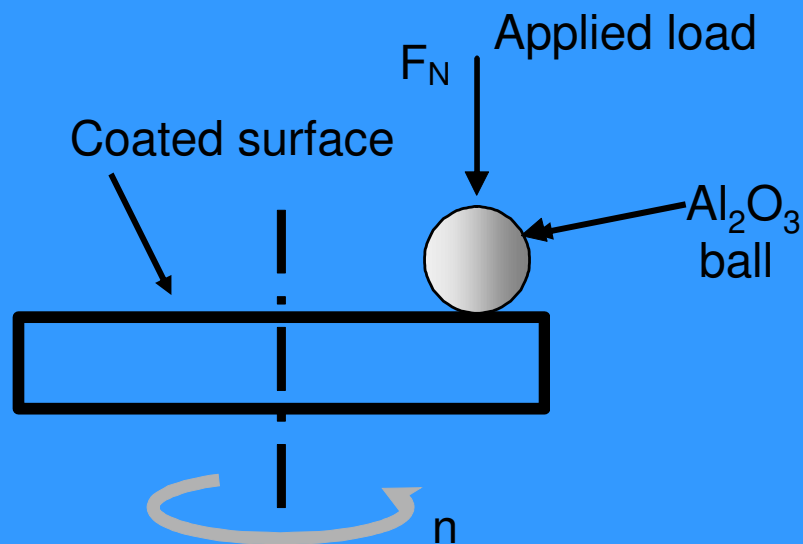
	Lc1 [N]	Lc2 [N]
TiN- mono	5,1	12,8
8x ratio 1-1	7,2	16,1
8x ratio 1-2	7	19,5
8x ratio 1-4	7	28

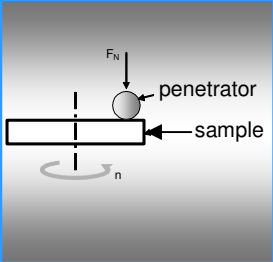


$$\text{Wear} - V_w = K(S * N / H)$$

*J.F. Archard,
J. Appl. Phys. 24(1953)981*

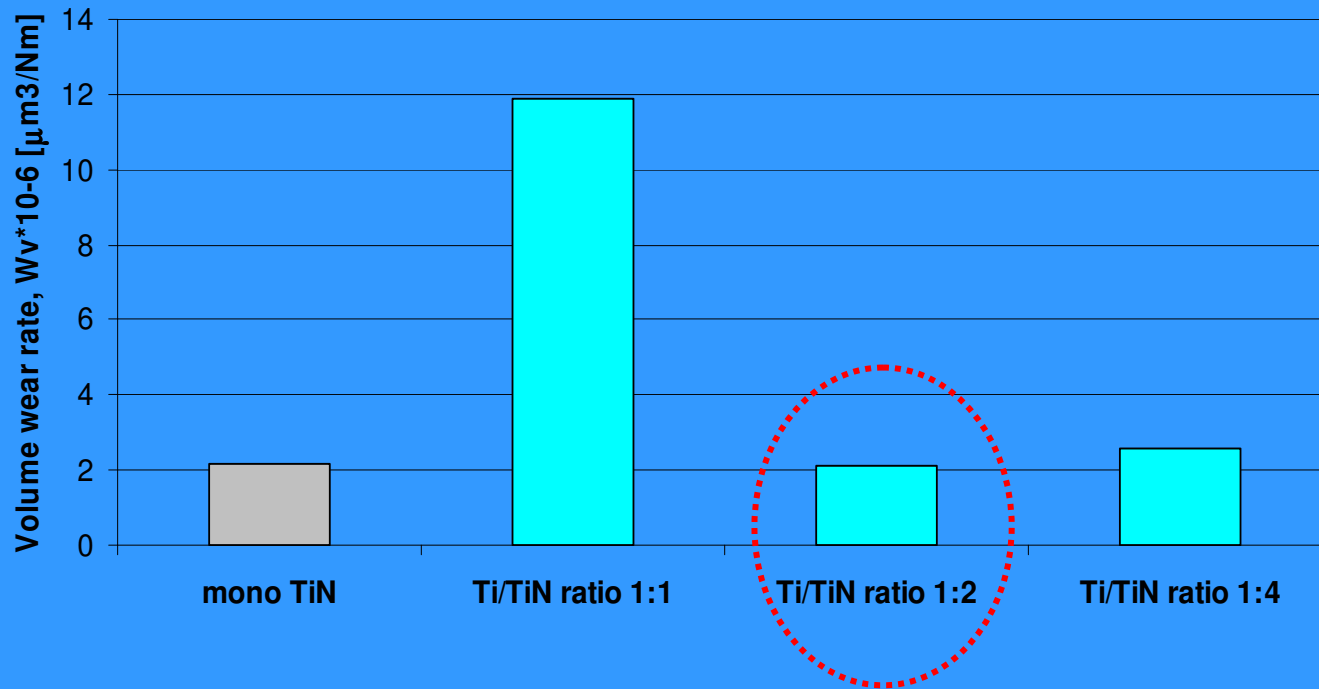
V_w – amount of the removed material, S – distance, N – load, H – hardness, K – wear coefficient

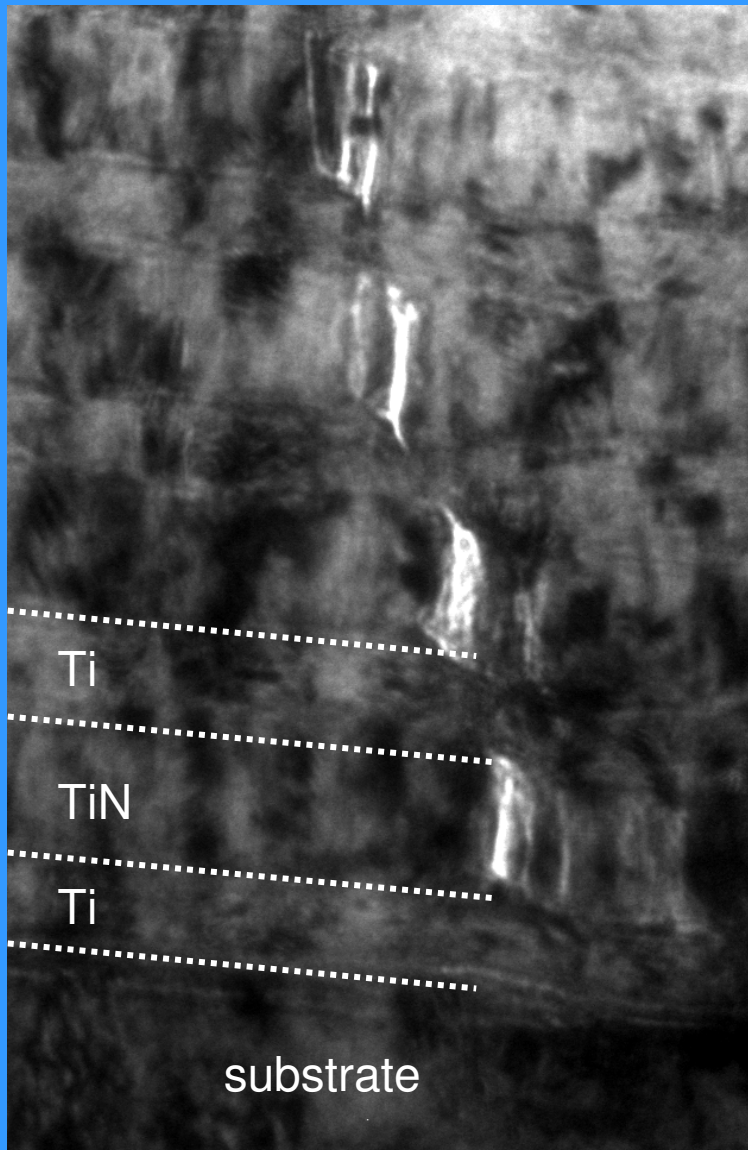




wear

	$W_v \cdot 10^{-6}$ [$\mu\text{m}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$]	Deviation.
TiN- mono	2,17	0,6
Ti/TiN-1:1	11,9	2,5
Ti/TiN-1:2	2,115	0,4
Ti/TiN-1:4	2,55	1,02





Conclusions

-As deposited single layered (TiN) coatings were characterised by vertical cracking caused by residual stress. Under the applied load, cracks at grain boundaries open fast leading to coating fragmentation exposing substrate.

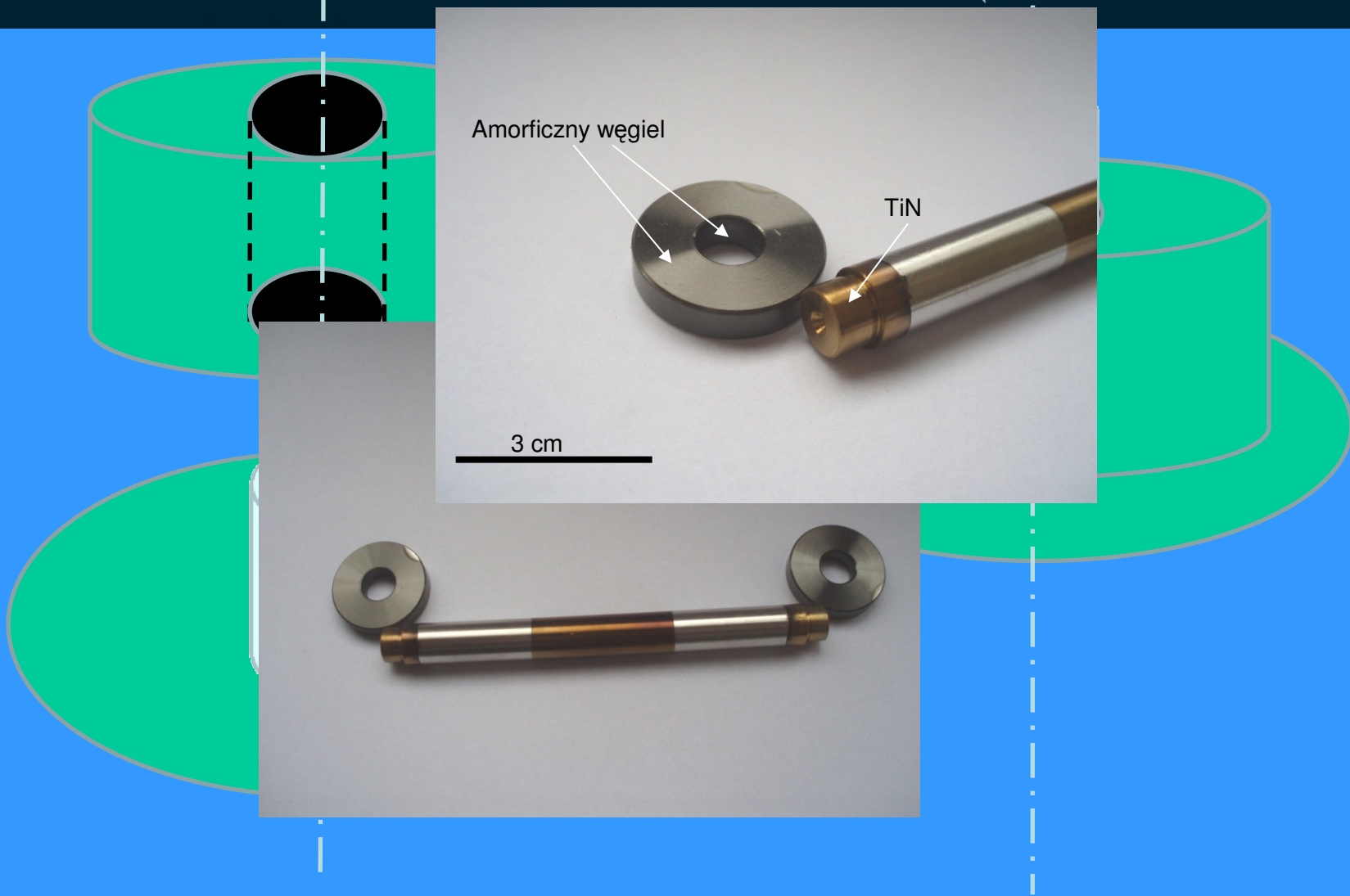
- The multilayer TiN/Ti coatings deform both by brittle cracking of ceramic and plastic deformation of metallic layers. The TiN/Ti multilayer hardness and wear was at the level of TiN till the ceramic phase dominated.

- The deformation and wear of multilayer TiN/Ti multilayer coatings proceeds keeping continuity of metallic layers and therefore protecting substrate (keeping corrosion at bay).



Schemat

Elementy cierne





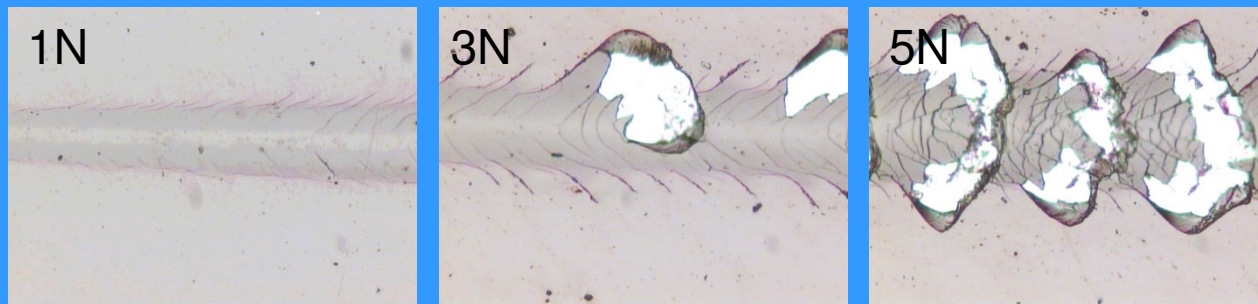
Elementy cierne

DLC	10mN			
	hmax [nm]	HV	HiT [GPa]	E [GPa]
Średnia	150	1190	12539,1	177
Odchyl.st	8	44,0	463,9	10

TiN	10mN			
	hmax [nm]	HV	HiT [GPa]	E [GPa]
Średnia	126	1410	14865,6	273
Odchyl.st	8	62,6	659,3	22

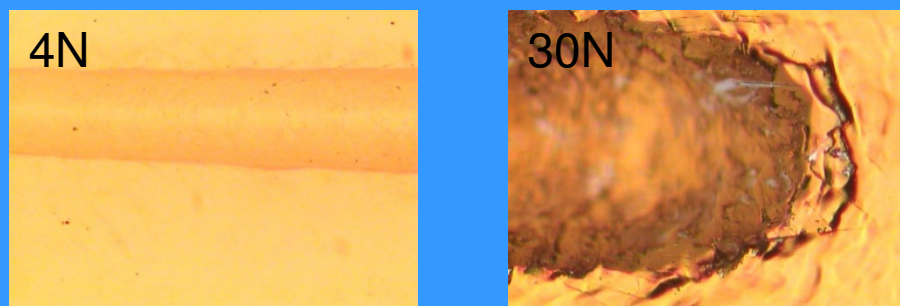
10mN

DLC



Rockwell
200 μm
0.01-30N

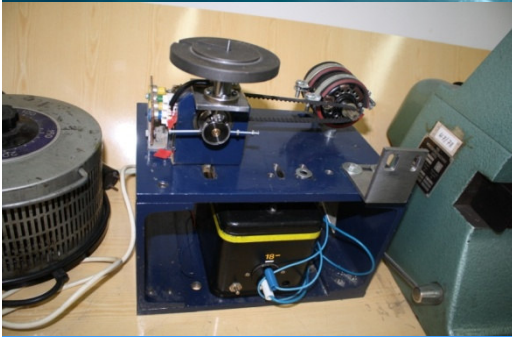
TiN



Powłoka	Wskaźnik zużycia	Współczynnik tarcia
DLC	18,11	0,09
TiN	8,86	0,2

Kula- tarcza
ISO 20808:2004

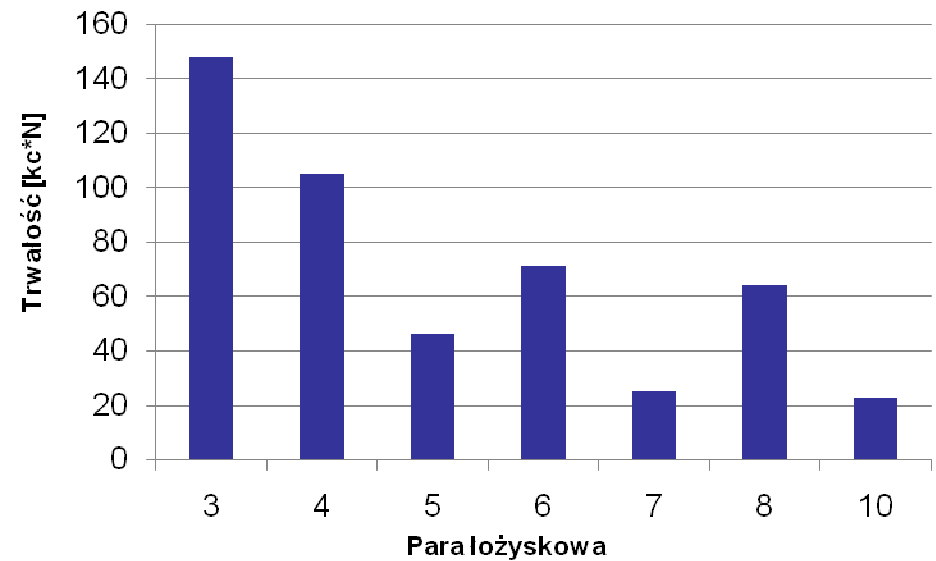
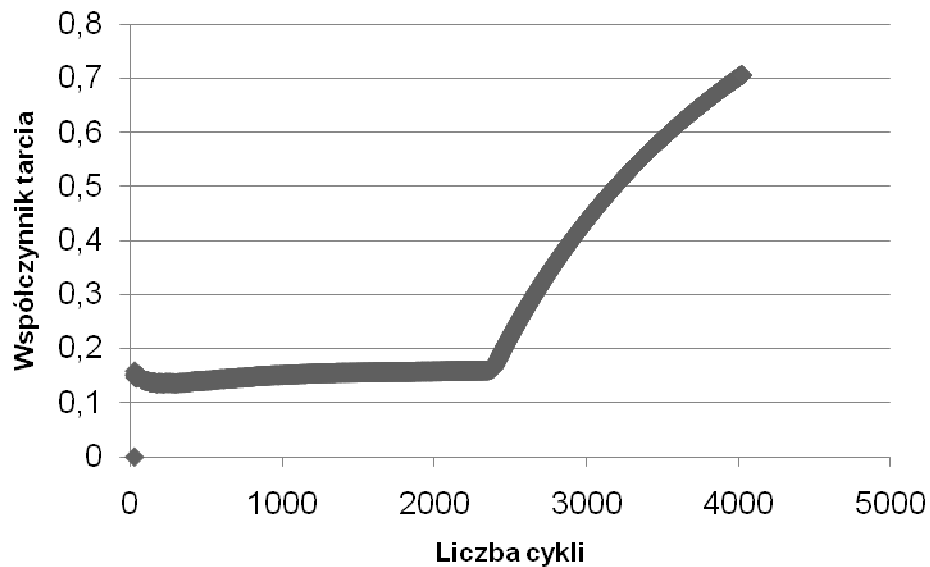
Elementy cierne



Para Siła >	wsp tarcia	wsp tarcia	wsp tarcia	wsp tarcia	wsp tarcia
	1N	3N	5N	8N	12N
Para 3	0,11	0,11	0,11	0,12	0,15
Para 4	0,08	0,11	0,12	0,13	0,14
Para 5	0,07	0,07	0,14		
Para 6	0,13	0,12	0,14	0,2	
Para 7	0,12	0,14	0,17		
Para 8	0,1	0,12	0,15	0,17	
Para 10	0,12	0,1			

-współczynnik tarcia przy obciążeniu 1N, obrotach 150obr/min i w trakcie testu obejmującego 20000 cykli.

- sekwencja obciążeń: 3N-5000cykli, 5N-5000cykli, 8N-5000cykli i 12N-5000cykli.

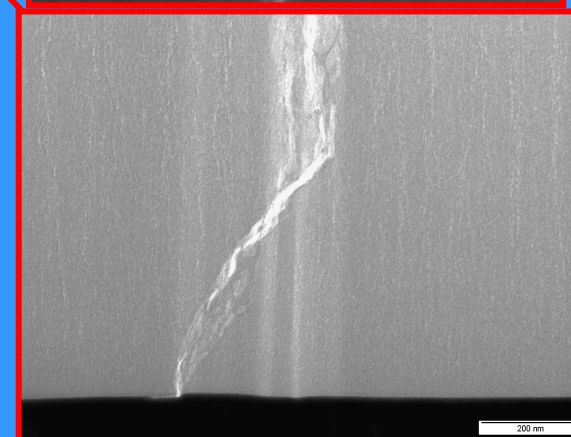
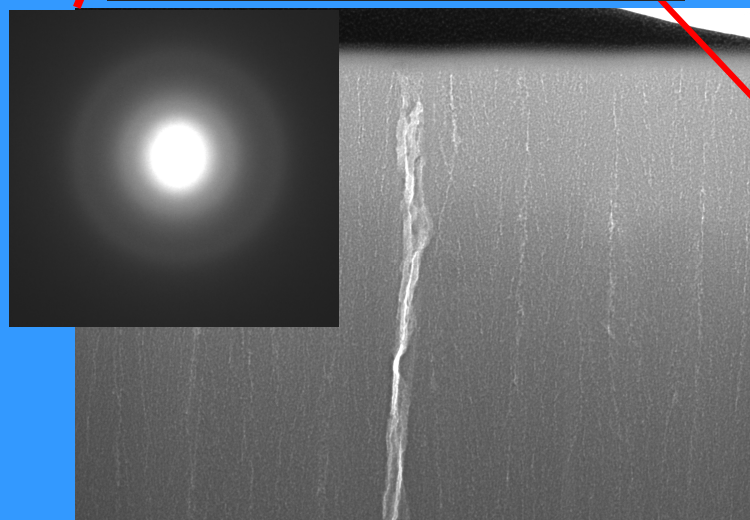
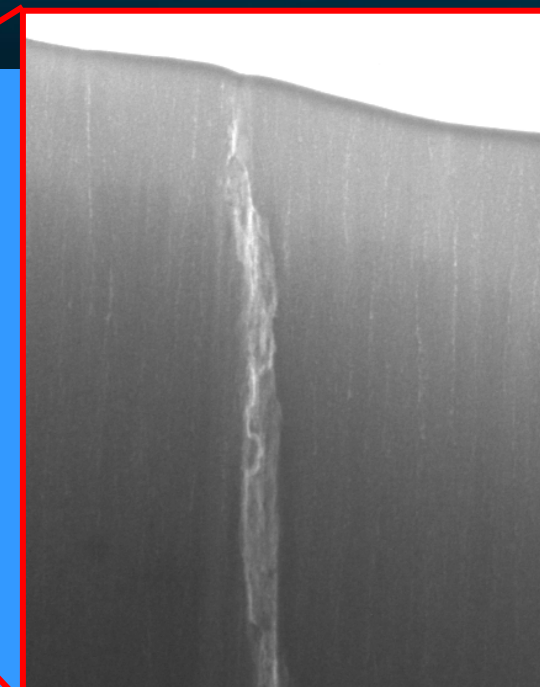
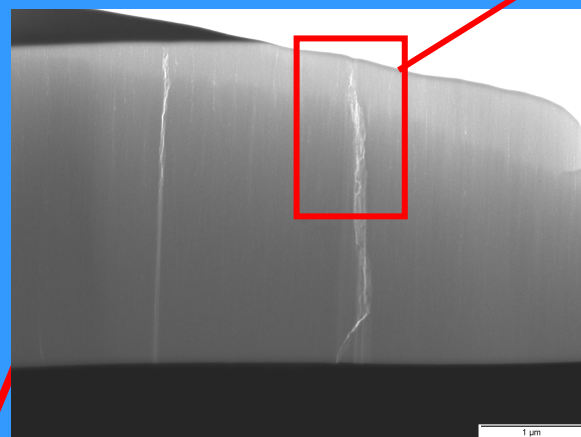
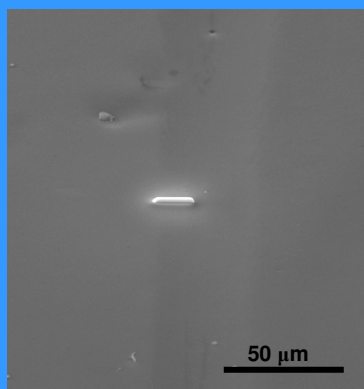




Mikroskopia elektronowa TEM

Elementy cierne

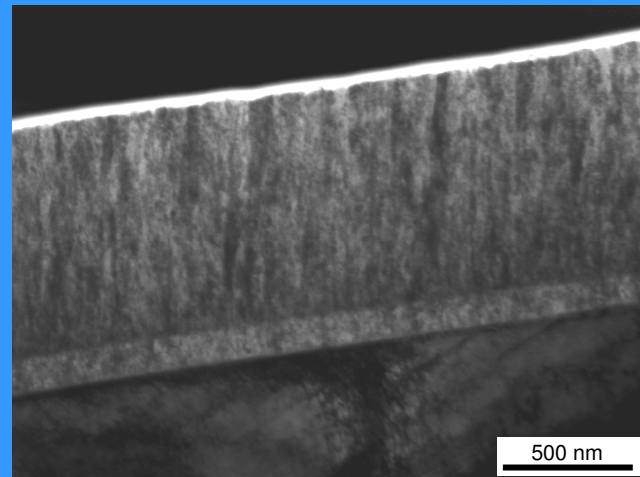
Powłoka amorficznego węgla
Test- 1N/ 2000 cykli





Mikroskopia elektronowa TEM

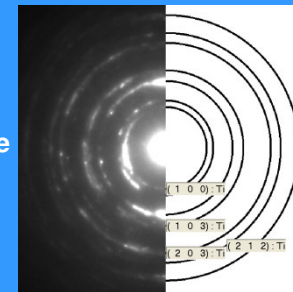
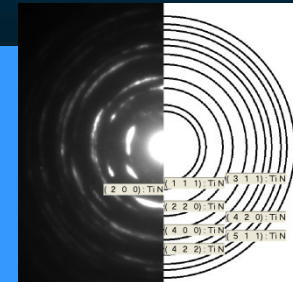
Elementy cierne



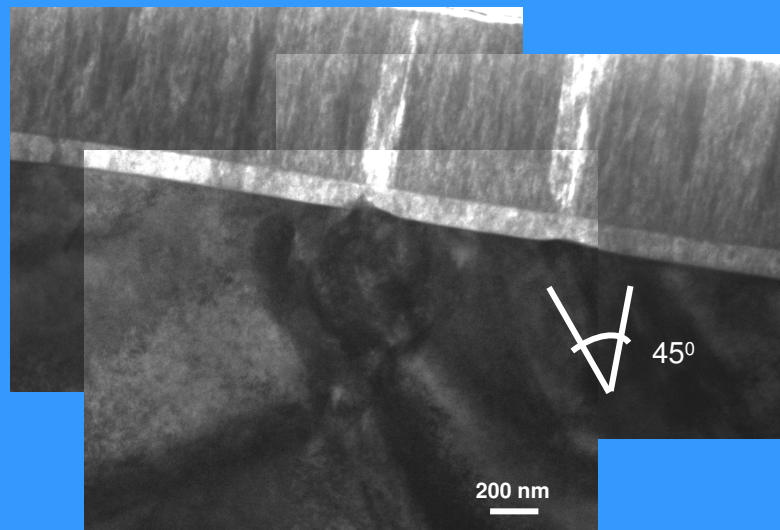
TiN

Ti

podłoże

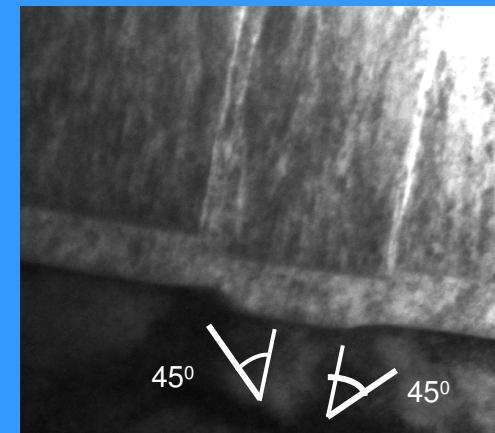


Powłoka TiN
Test- 0,25N/ 20000 cykli



45°

200 nm



45°

45°

11. Wyładowanie magnetronowe w procesach plazmowych

Źródła rozpylania

- System rozpylania diodowego
- Konwencjonalny magnetron
- Niezbalansowany magnetron
- Nisko-ciśnieniowy magnetron
- Magnetron ze wspomaganie jonizacyjnym z użyciem wiązki elektronów, rf lub wyładowania mikrofalowego
- Magnetron jonizujący
- Wysokiej mocy, szybki magnetron
- System rozpylania z magnetronem o zamkniętym polu
- Magnetron podwójny

- System rozpylania diodowego

Podłoże leży na anodzie zanurzone w plaźmie

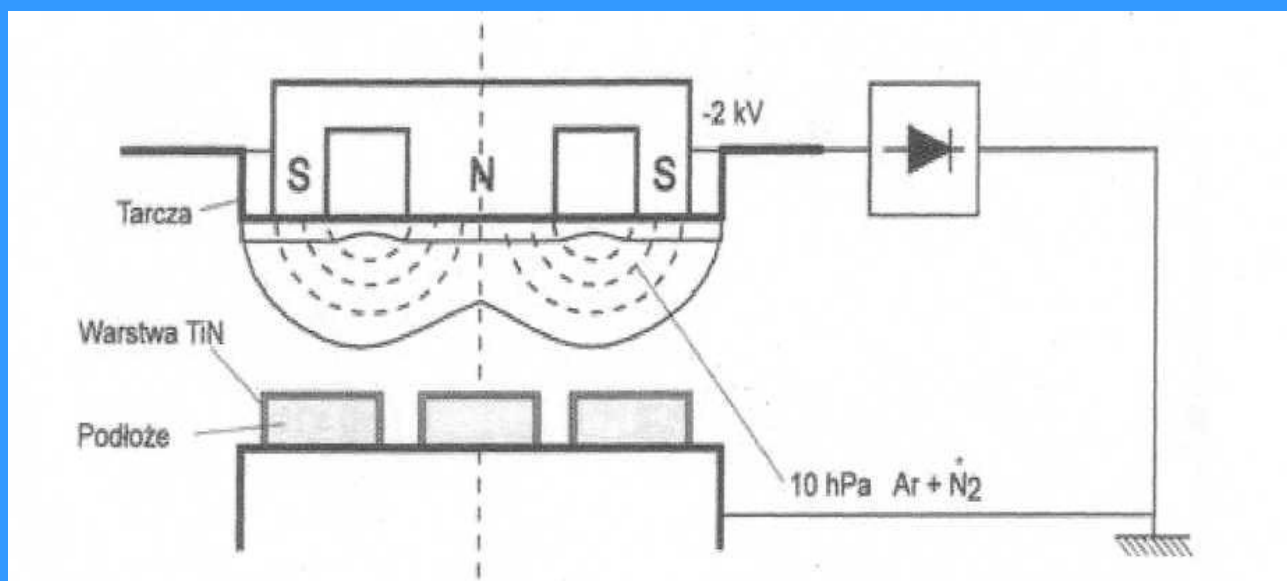
- Konwencjonalny magnetron

Pole magnetyczne jest zastosowane aby utrzymać wyładowanie jarzeniowe w pobliżu rozpylanej katody (tarczy); obwód magnetyczny zlokalizowany jest poza rozpylaną katodą tworząc ponad nią półeliptyczny kanał pola magnetycznego

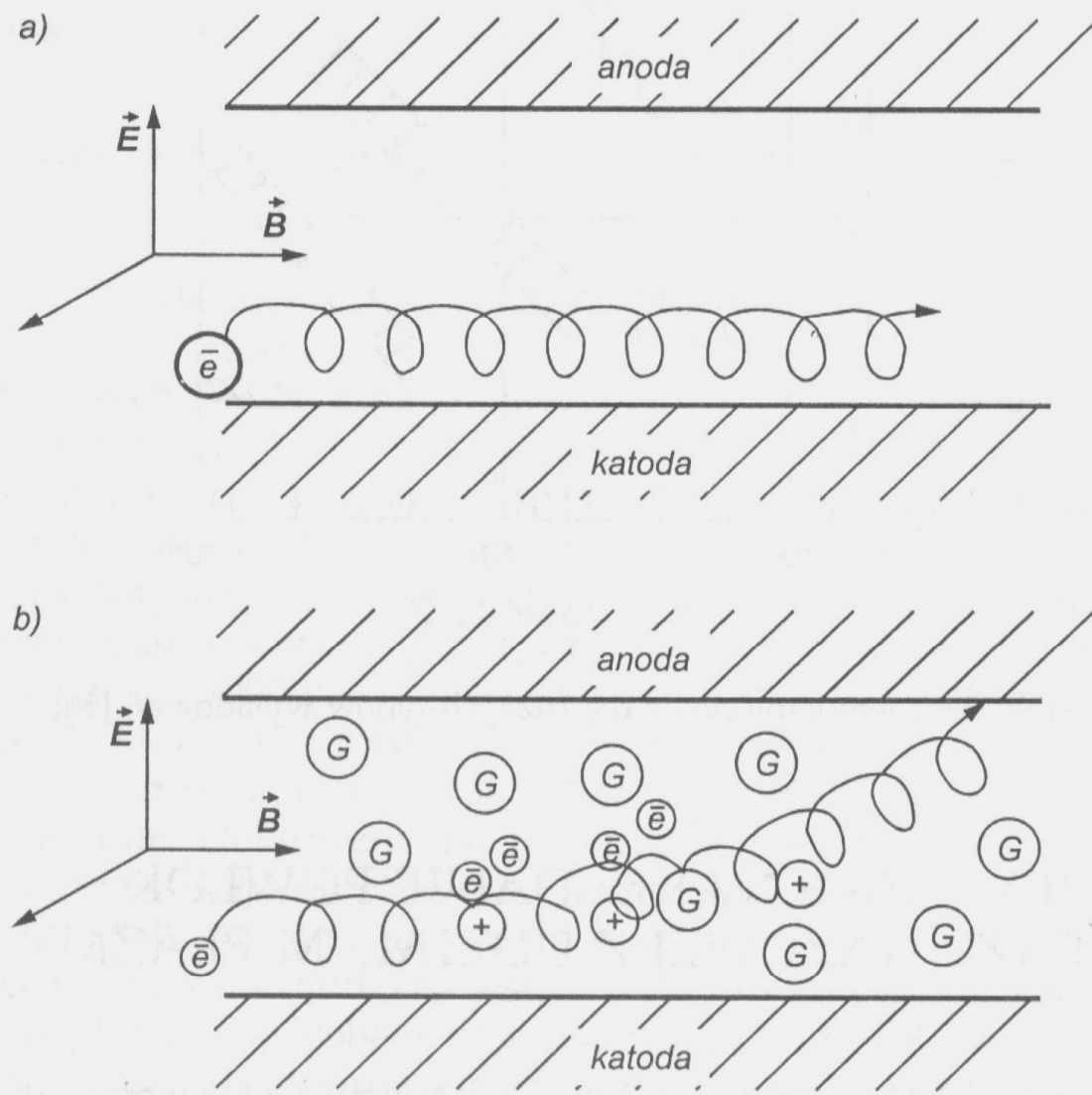
- Niezbalansowany magnetron

Ze względu na bardzo istotne uwięzienie plazmy w pobliżu tarczy, podłoże znajduje się w plaźmie o niskiej gęstości; uzyskuje się ten system poprzez zastosowanie dodatkowego zewnętrznego obwodu magnetycznego; zaletą jest: możliwość ciągłej kontroli pola ponad tarczą (i) oraz utrzymania stałego napięcia wyładowania jarzeniowego podczas pracy tarczy (ii)

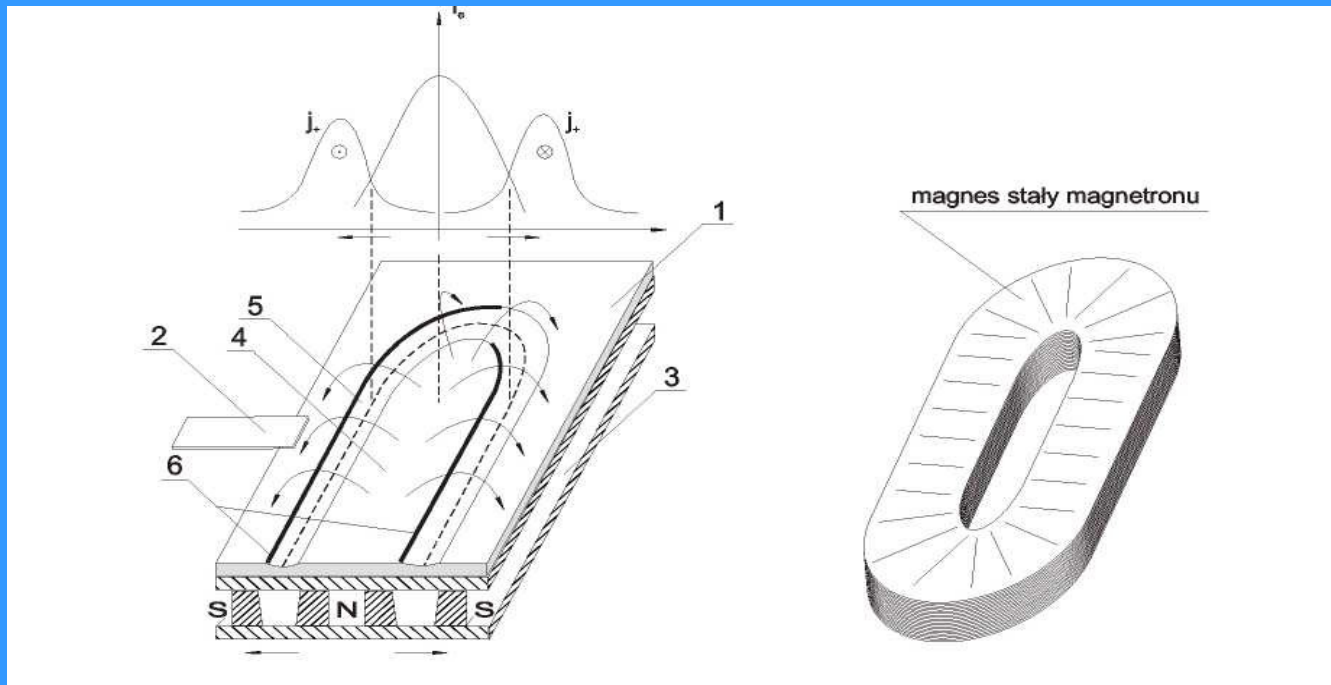
Rozpylanie w polu magnetycznym , czyli tzw. rozpylanie magnetronowe, zapewnia wydłużenie drogi swobodnej elektronów, dzięki czemu można uzyskać gęstość prądu jonowego 10 – 100 razy większą niż przy prostym rozpylaniu, z jednoczesnym obniżeniem ciśnienia w środowisku reakcji (komorze). Schemat układu do osadzania pokryć z wykorzystaniem rozpylania magnetronowego przedstawia poniższy rysunek.



Schemat ideowy rozpylania magnetronowego



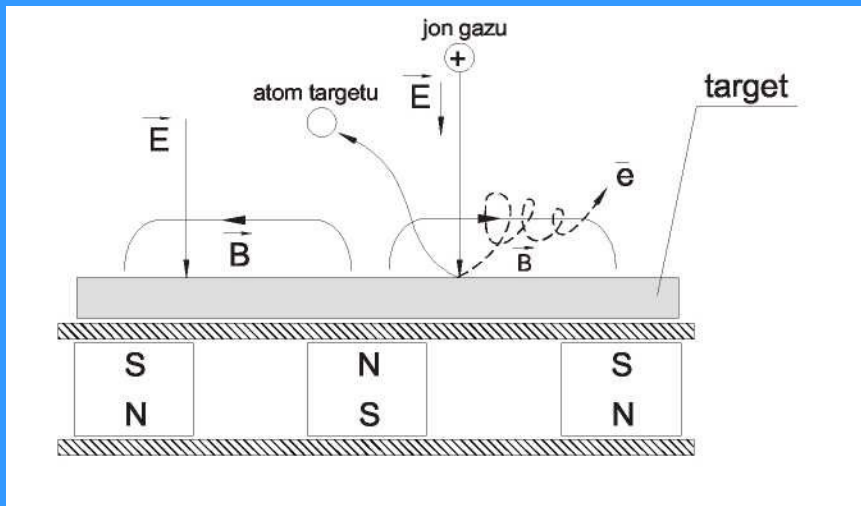
Ruch elektronu w skrzyżowanych polach \mathbf{E} i \mathbf{B} : a) tor elektronu w gazie silnie rozrzedzonym (brak zderzeń), b) tor zakłócony zderzeniami z cząsteczkami gazu, powielanie elektronów



Schemat źródła magnetronowego (przekrój) i magnesu stałego

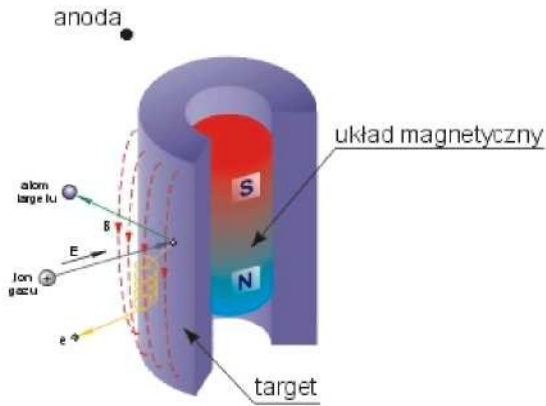
- 1 - target-katoda , 2 - anoda
- 3 - nabiegunniki, 4 - przestrzeń środkowa
- 5 - przestrzeń erozyjna, 6 - pobocze z warstwą ustronną

Niejednorodne pole magnetyczne magnesu trwałego zakrzywia tor elektronu, wybitego z powierzchni targetu w wyniku bombardowania jonowego i prowadzi go stycznie wzdłuż linii sił pola przy powierzchni. Spiralny ruch elektronu zwiększa prawdopodobieństwo zderzeń a tym samym wzmocnienie jonizacji. Wzmocnienie to przynosi wzrost szybkości rozpylania.

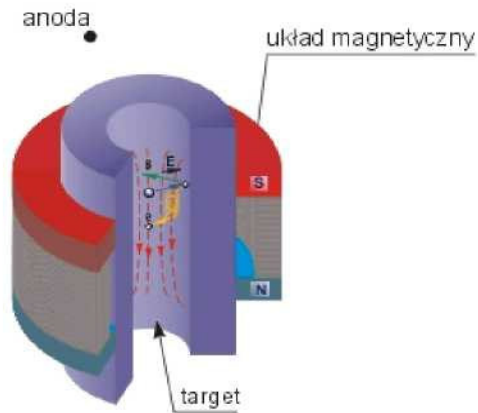


Ruch elektronu w polu magnetycznym magnetronu

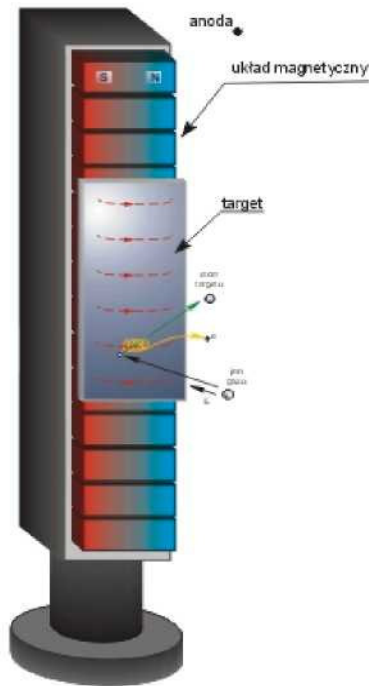
a) cylindryczne prętowe



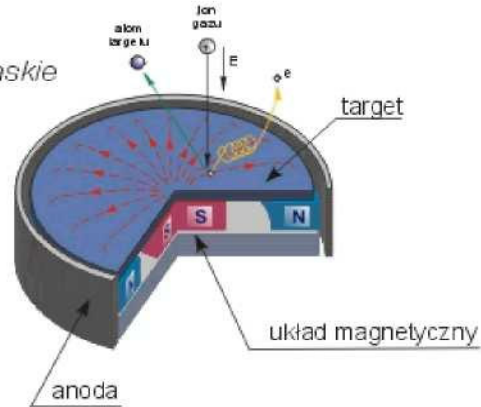
b) cylindryczne wewnętrzne



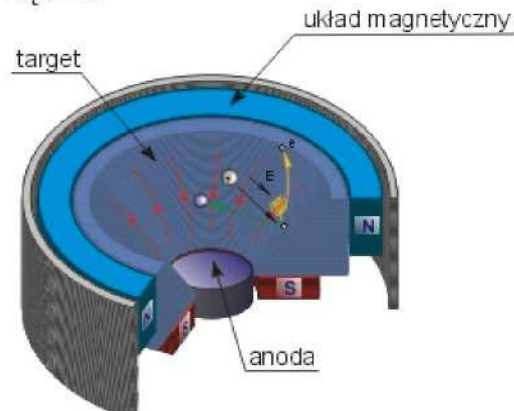
c) liniowe



d) płaskie



e) kątowe



Rozwiązania konfiguracji układów magnetycznych do różnych typów magnetronów

Schematy (Pau 3.1)

- (a) Systemu rozpylania diodowego
- (b) Konwencjonalnego magnetronu
- (c) Niezbalansowanego magnetronu

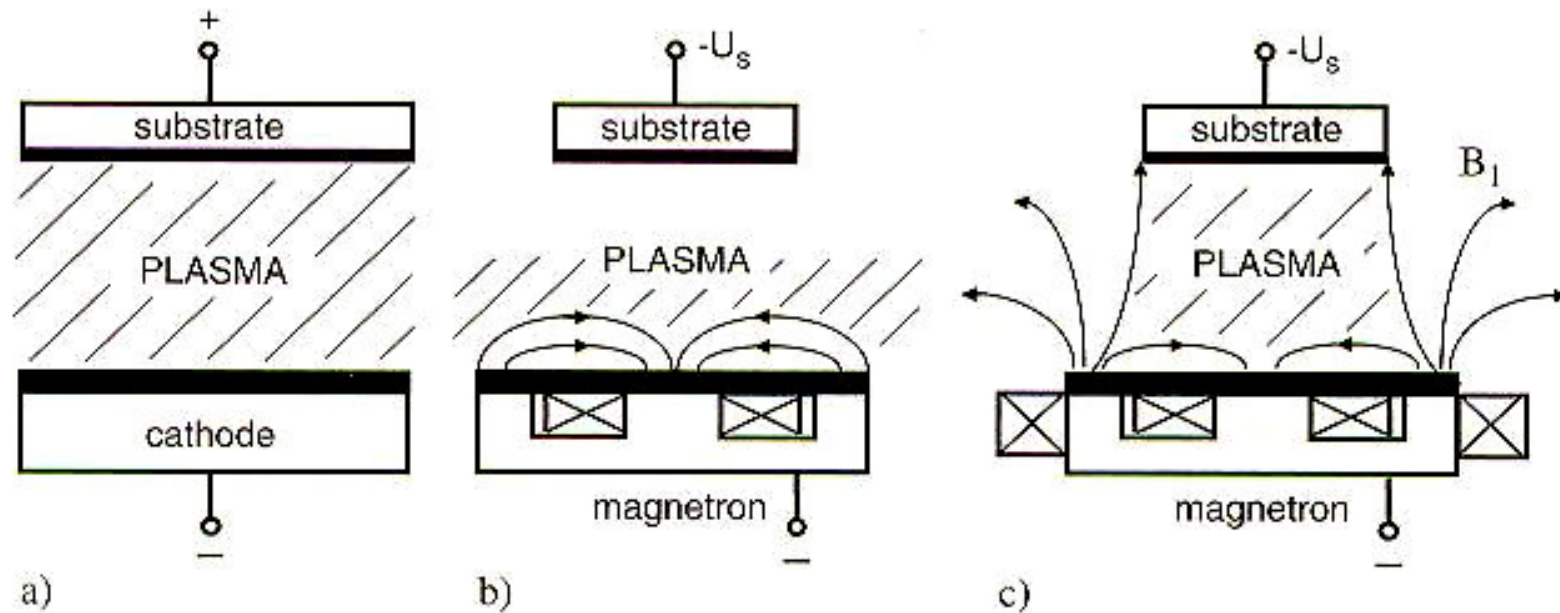


Figure 3.1: Comparison of (a) diode sputtering system with (b) CM and (c) UM.

- **Nisko-ciśnieniowy magnetron**

Głównym problemem przy rozpylaniu przy niskim ciśnieniu jest eliminacja utraty naładowanych cząstek pochodzących z wyładowania; stosuje się poprawę uwięzienia plazmy lub/i zastosowanie dodatkowej jonizacji rozpylonego gazu

Zasada rozpylania nisko-ciśnieniowego: (Pau 3.2)

(a) Poprawa uwięzienia; (b) dodatkowa jonizacja

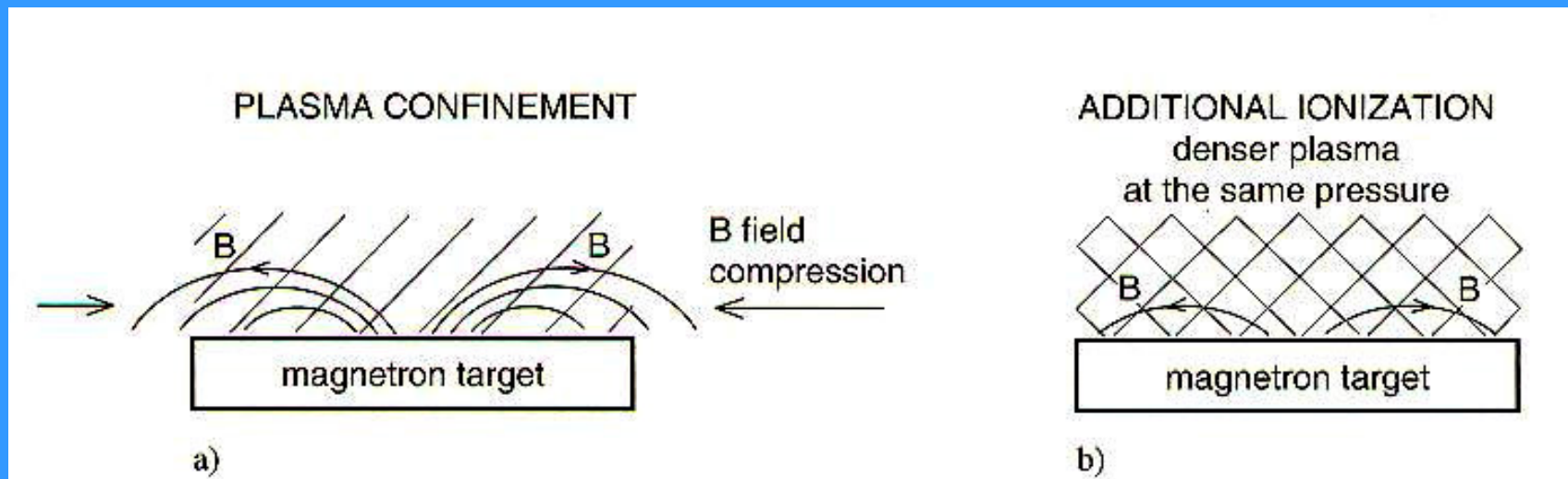


Figure 3.2: The basic principles of low-pressure sputtering discharge based on (a) the improvement of plasma confinement and (b) the additional ionization of magnetron discharge.

- Magnetron ze wspomaganiami jonizacyjnymi z użyciem wiązki elektronów, rf lub wyładowania mikrofalowego
Utrata naładowanych cząstek może być kompensowana poprzez dodatkową jonizację rozpylonego gazu

Magnetron z dodatkową jonizacją gazu: (Pau 3.4)

- Magnetron konwencjonalny z wiązką elektronów z gorącej katody
- Magnetron konwencjonalny ze źródłem łukowej katody wydrążonej

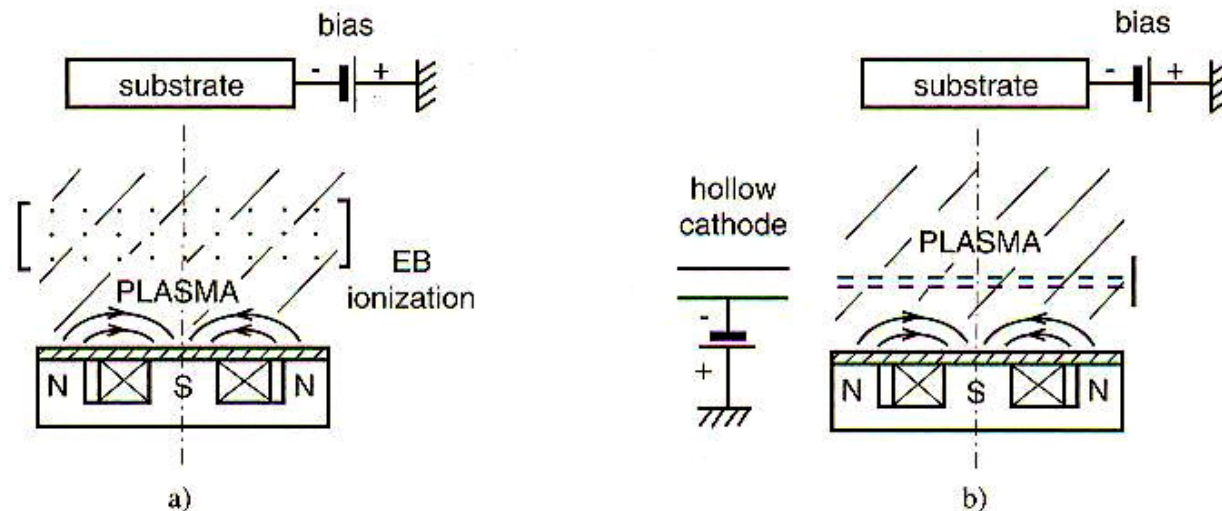


Figure 3.4: Magnetron with additional gas ionization (a) CM with the hot cathode electron beam and (b) CM with the hollow cathode arc electron source.

- Magnetron jonizujący

Podczas wyładowania w magnetronie obecne są głównie jony Ar^+ , jonizacja rozpylonych atomów jest mała ok..1% lub mniej ale bardzo ważna ze względu na zastosowania (poprawia jednorodność osadzania w wąskich szczelinach); stosuje się cewki pomiędzy magnetronem a podłożem

Zasada magnetronu jonizującego (Pau 3.5)

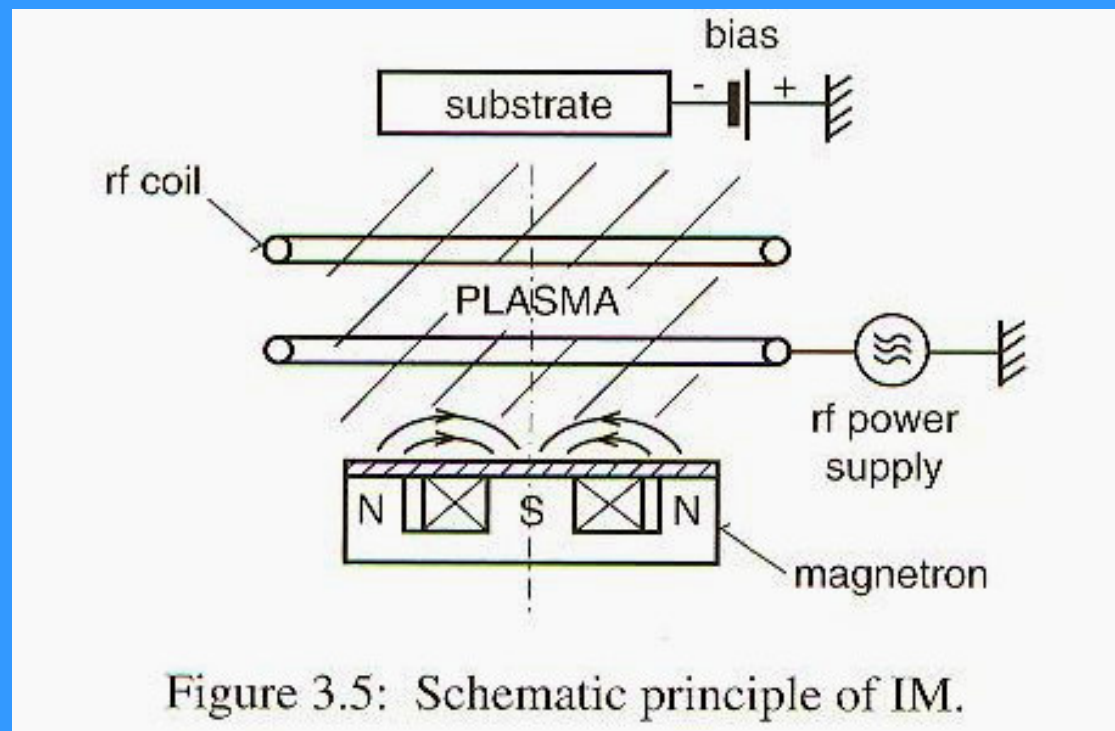


Figure 3.5: Schematic principle of IM.

- System rozpylania z magnetronem o zamkniętym polu
- Magnetron podwójny

Doskonałe uwięzienie plazmy podczas wyładowania magnetronowego jest podstawowym założeniem dla optymalizacji w zaawansowanych procesach magnetronowych; stosuje się układy z jednym lub kilkoma magnetronami pracującymi w zamkniętej konfiguracji

Schemat systemu z czterema magnetronami w konfiguracji zamkniętej (Pau 3.7)

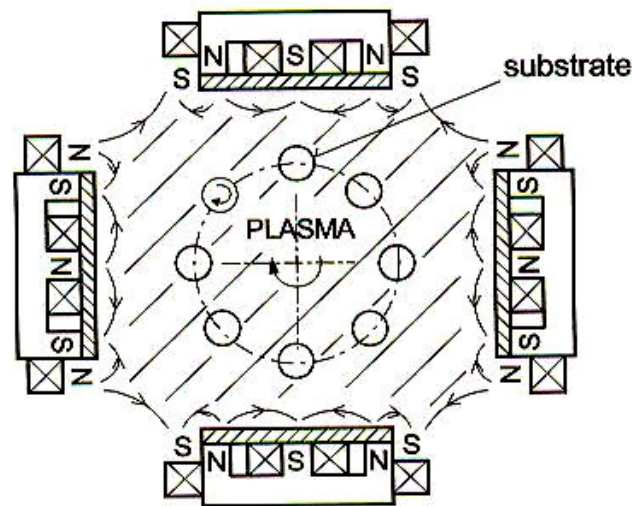


Figure 3.7: Schematic diagram of the sputtering machine with four magnetrons in a closed \mathbf{B} field configuration.

W zależności od parametrów procesu rozpylania wyróżnia się:

- 1. Niereaktywne rozpylanie przy stałym prądzie (dc) lub częstotliwości (rf)**
- 2. Rozpylanie reaktywne**
- 3. Rozpylanie wspomagane jonami argonu**
- 4. Nisko-ciśnieniowe rozpylanie**
- 5. Impulsowe rozpylanie dc lub rf**
- 6. Szybkie rozpylanie**
- 7. Samo-rozpylanie**
- 8. Rozpylanie wspomagane jonami rozpylonego materiału**
- 9. Impulsowe rozpylanie z napięciem bazy (bias)**
- 10. Nisko-energetyczne rozpylanie z bias**

Procesy 1-4 są stosowane

Procesy 5-10 są w przygotowaniu do wdrożenia

- **Wysokiej mocy, szybki magnetron**

Typowe magnetrony posiadają moce w zakresie od kilku Wcm^{-2} do

10 Wcm^{-2} , powodem rozwoju magnetronów dużej mocy jest:

- Wzrost szybkości osadzania i skrócenie czasu procesu
- Alternatywna technologia mogąca zastąpić szybkie ale nieekologiczne metody galwaniczne
- Poprawy jonizacji rozpylanego materiału
- Eliminacji gazu tworzącego się w procesie rozpylania

Argon stosuje się zazwyczaj jako gaz w rozpylaniu

Ze względu na poziom ciśnienia gazu p_{Ar} magnetrony dzieli się na cztery grupy:

1. konwencjonalne rozpylanie $p_{\text{Ar}} \geq 0.1 \text{ Pa}$
2. nisko-ciśnieniowe rozpylanie $p_{\text{Ar}} \leq 0.1 \text{ Pa}$
3. Szybkie rozpylanie przy $p_{\text{Ar}} > p_0 \approx 10^{-3} \text{ Pa}$
4. samo-rozpylanie przy $p_{\text{Ar}} = 0$

12. Modyfikacja powierzchni poprzez oddziaływanie jonów

- Modyfikacja powierzchni materiałów poprzez zanurzenie w plazmie i implantację jonów (Plasma Immersion Ion Implantation PIII)
- Oddziaływanie jonów na powierzchnię materiałów

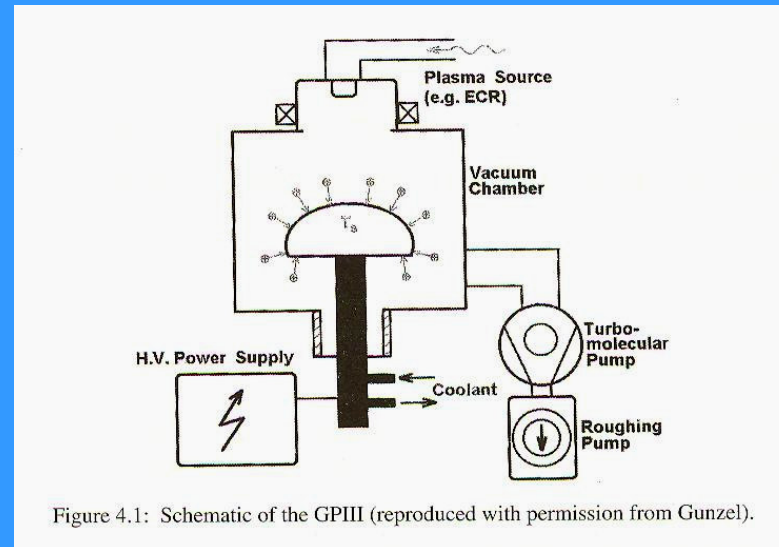
PIII – stosuje się do modyfikacji powierzchni półprzewodników, metali, izolatorów; materiał zanurzony jest w plazmie przy danym potencjale (ujemny potencjał – impulsowy)

W zależności od źródła plazmy:

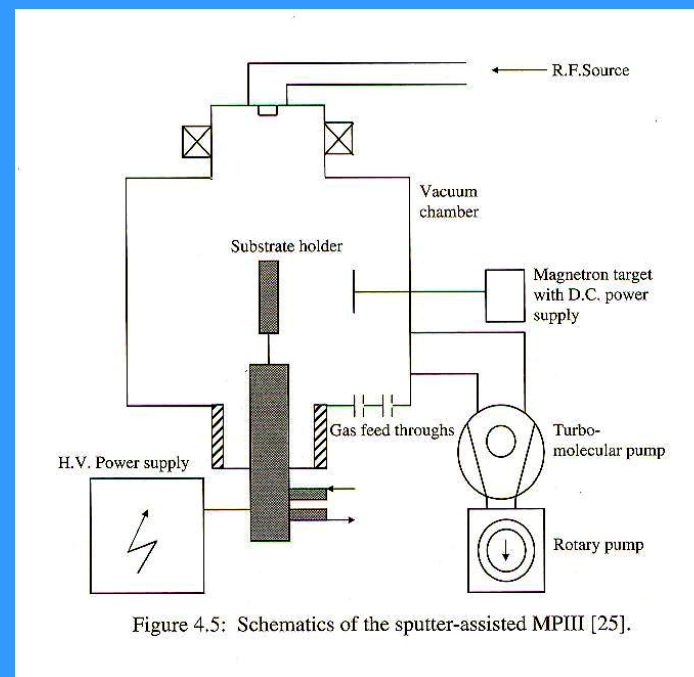
gazowe (GPIII),

ciało stałe – metal (MPIII) – proces katodowy lub rozpylanie

Schemat gazowego systemu GPIII (Pal 4.1)



Schemat systemu wspomaganego poprzez rozpylanie MPIII (Pal 4.5)



Różnica do zanurzenia w plazmie (PIII) – wyższa energia; wystąpienie łuku elektrycznego kontroluje maksymalną energię

Źródło energii do implantacji jonów –

konieczność jonizacji gazu lub pary stosując elektrony o energii 100-200 eV (redukcja ciśnienia)

Zasada procesu:

jony przyśpieszone elektrycznie do dużych szybkości uderzają w powierzchnię (są implantowane), a celem jest podwyższenie właściwości: elektrycznych, tribologicznych, korozyjnych itp.

System składa się:

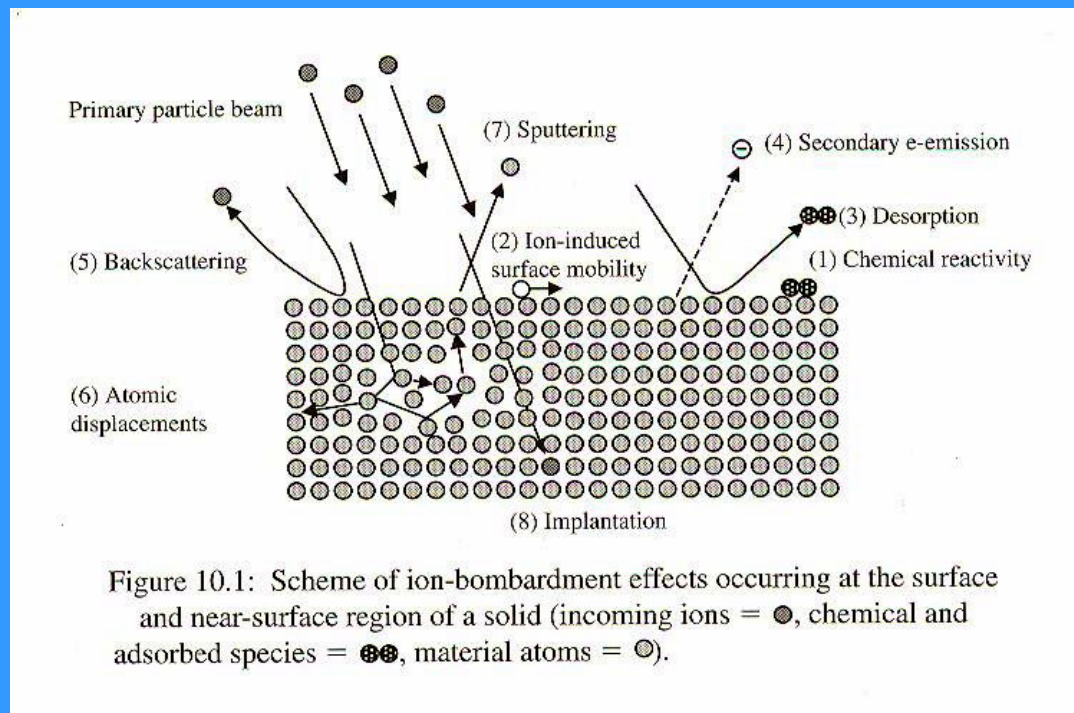
ze źródła jonów

ze źródła wysokiego napięcia

Zastosowanie: do metali i stopów (głównie implantacja jonów azotu), ceramiki, polimerów

Oddziaływanie jonów z powierzchnią

W wyniku oddziaływania energetycznych cząstek lub jonów z atomami tarczy zachodzi szereg procesów (Pau 10.1)



Uporządkowanie efektów oddziaływania cząstek energetycznych w zależności od energii (Pau 10.2)

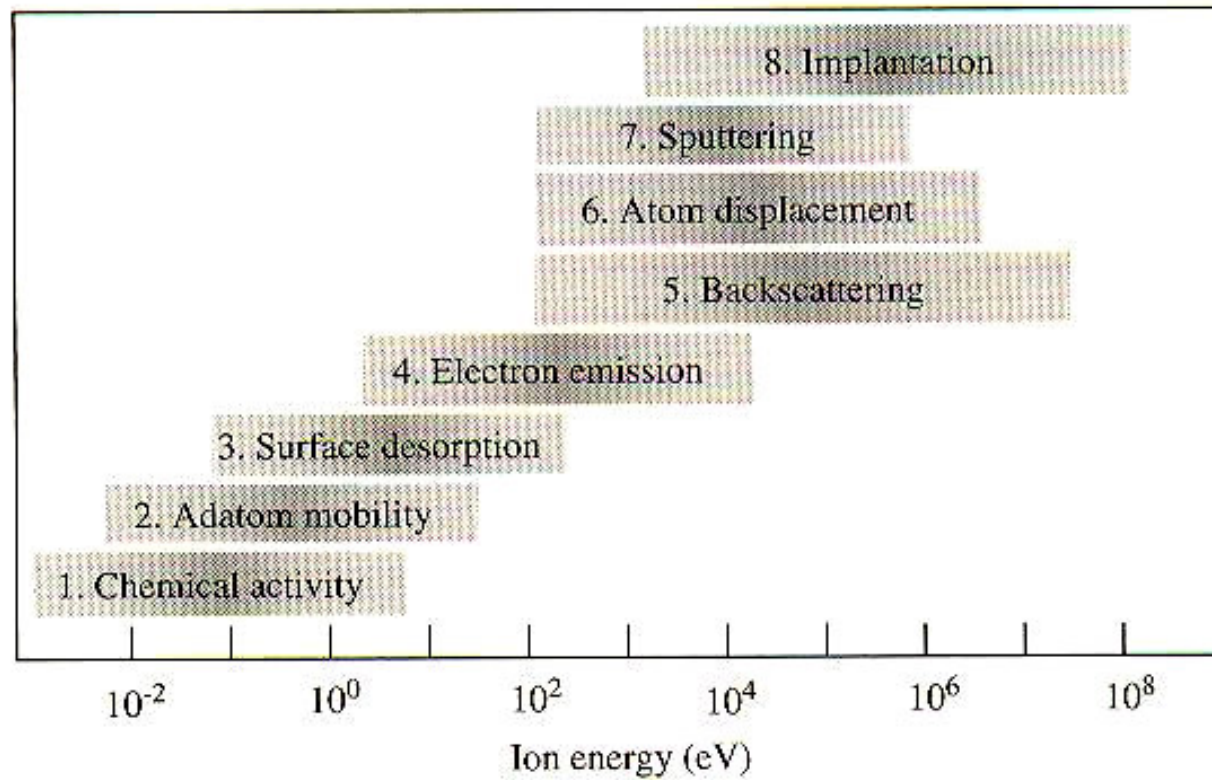


Figure 10.2: The different effects displayed in Fig. 10.1 sorted by their energy range.

13. Modyfikacja powierzchni poprzez plazmową implantację jonów

Wybrane jony są przyspieszane elektrycznie do dużych prędkości i wbijane lub implantowane do obrabianego materiału celem podwyższenia właściwości (elektrycznych, tribologicznych, antykorozyjnych)

System do implantacji powinien posiadać:

- Źródło jonów
 - System wysokiego napięcia
 - Komorę zabezpieczającą przed przebicciem elektrycznym
- ponadto: system separatora jonów, próżniowy (10^{-6} mbara), kontroli próżni

14. Modyfikacja powierzchni nisko-energetyczną i wysoko-prądową wiązką elektronów

- Źródła o szerokiej aperturze $\geq 50\text{cm}^2$
- Niskiej energii do około 40eV
- Dużym prądzie do około 50kA

przy mikrosekundowym oddziaływaniu wiązki elektronów na materię

Efekty wywołane transferem ciepła:

- resolidification
- kontrolowane odparowanie
- czyszczenie powierzchni
- stopowanie w warunkach nierównowagowych

15. Laserowa modyfikacja powierzchni poprzez przetopienie

Szybka krystalizacja → mikrostruktura

- Lokalizacja dyfuzji w obszarze ziaren i szerokości granic
- Ograniczony zakres kolizji pomiędzy atomami

Normal

solidification

← Rapid solidification →

$$\lambda^2 V = \text{const.}$$

SOLUTE
TRAPPING

LOCALISATION OF DIFFUSION

V_0

10^{-5}

10^{-3}

10^{-1}

10^1

10^3

$d^2 V = \text{const.}$

V [m/s]

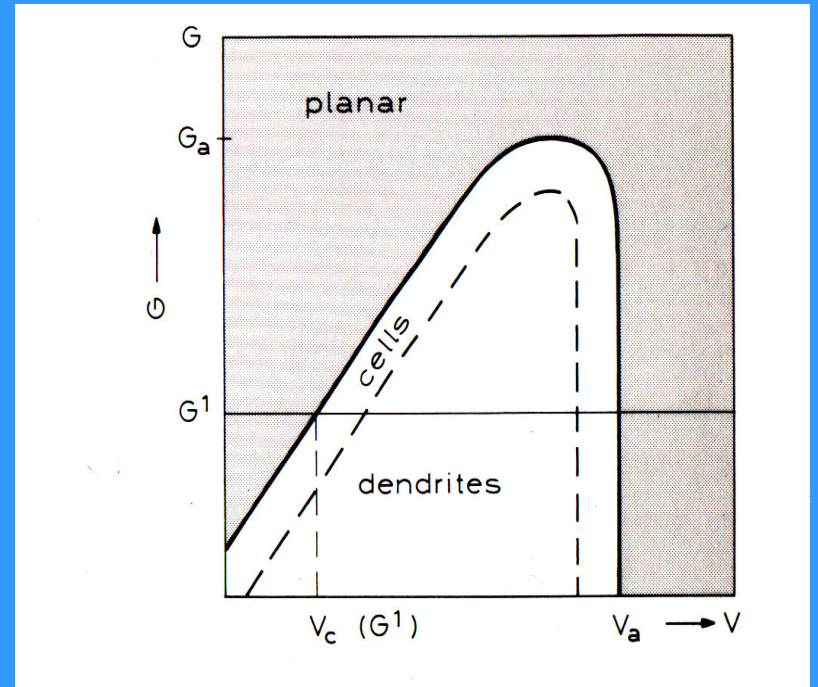
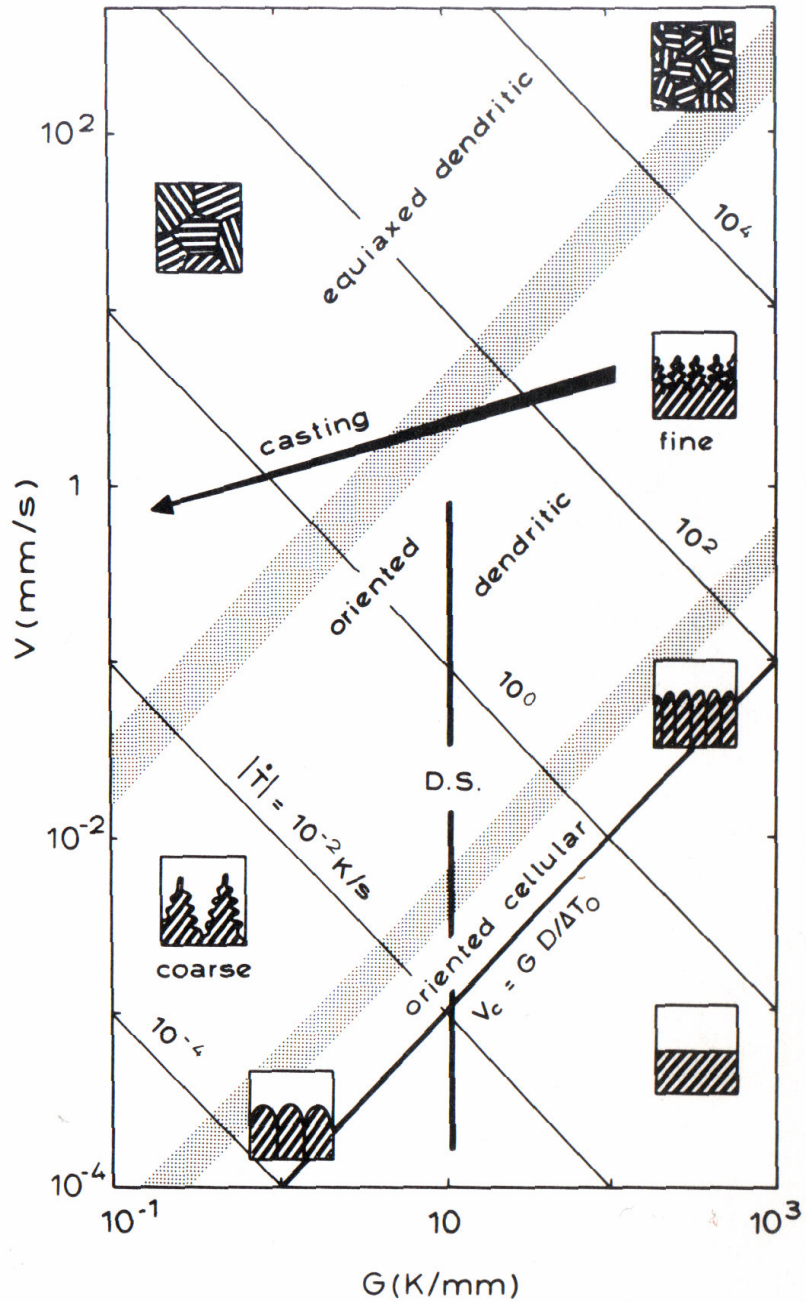
d- length of
microstructure

V- growth velocity

d represents

either λ { λ -eutectic spacing
or R { R- dendrite tip
radius

Fundamentals of Solidification

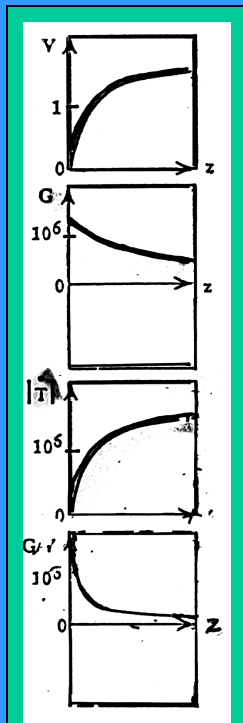
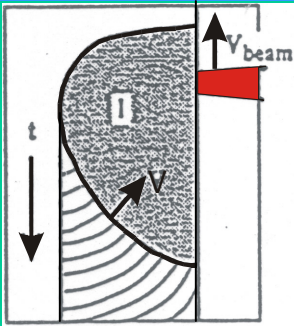


W. Kurz, D. J. Fisher, *Fundamentals of Solidification*;
 TRANS. TECH. PUBL. 1992

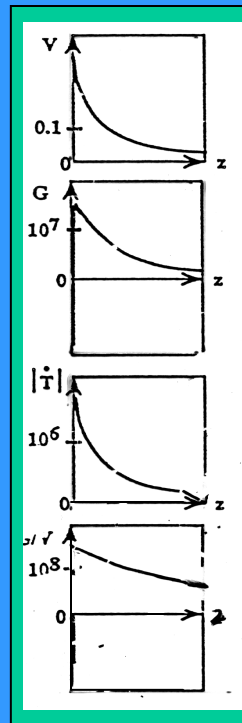
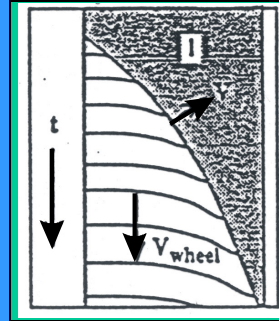
Rodzaje szybkiej krystalizacji

- a. Laserowe przetapianie powierzchni
- b. Odlewanie na wirujący walec
- c. Atomizacja

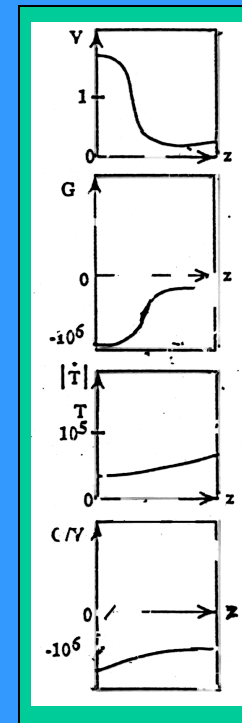
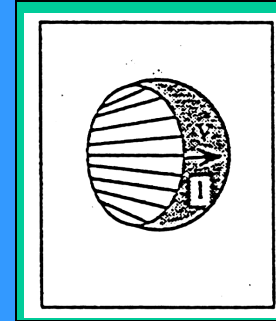
laser treatment



melt spinning



atomization



velocity (V)

temperature gradient (G)

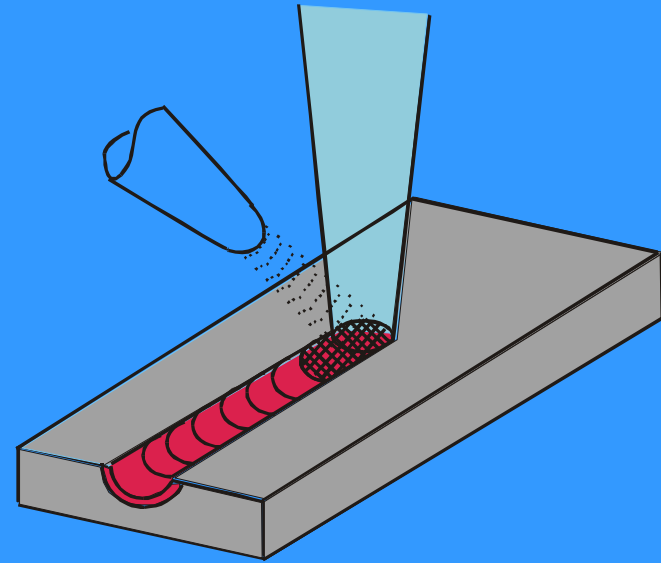
cooling rate (T)

G/V ratio

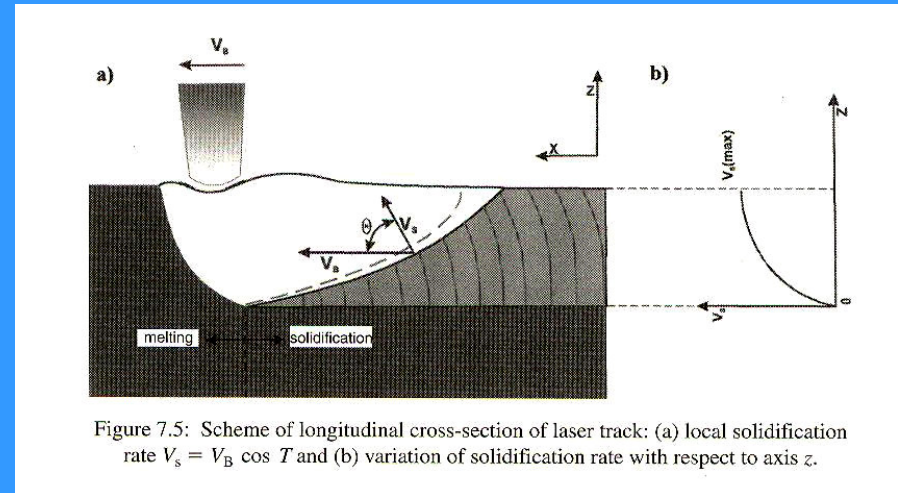


•Laser Modification

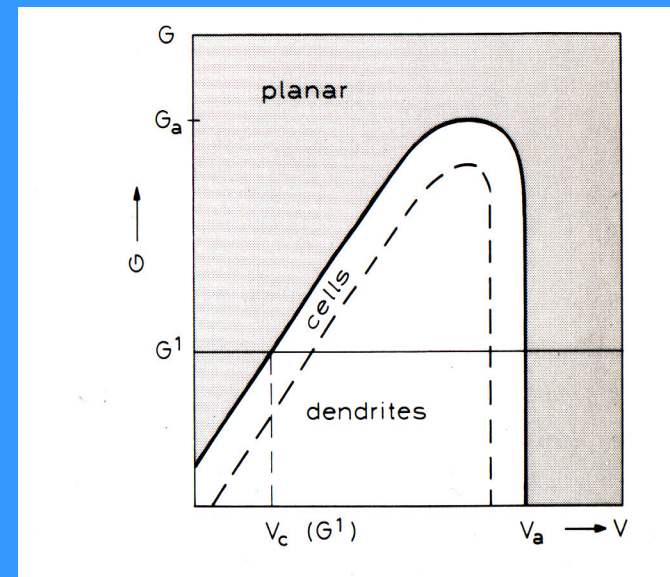
- Nd:YAG
- CO₂
- Diode laser



Przekrój poprzeczny strefy nadtopionej laserem (Pau 7.5)



Zakresy zmiany morfologii stabilnej (płaskiej) granicy międzyfazowej (Pau 7.6)



Przechłodzenie stężeniowe (Pau 7.7)

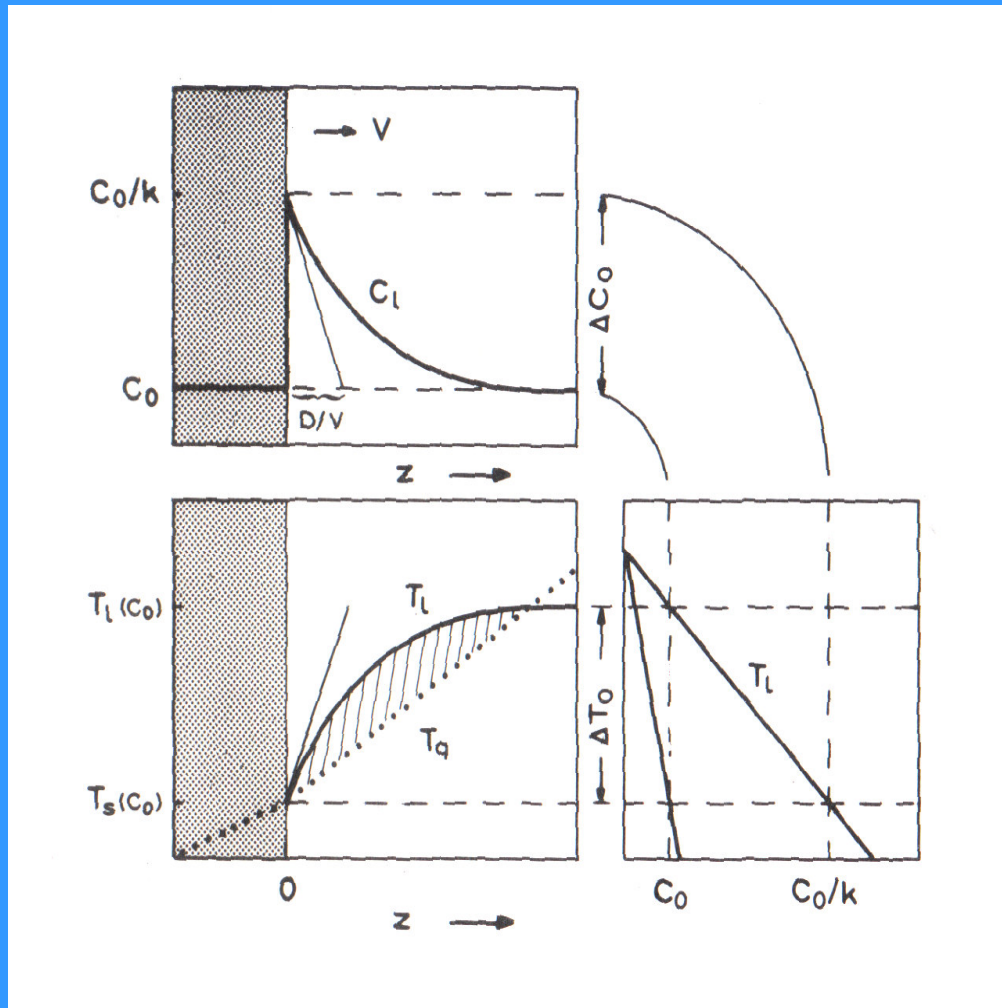
Lokalna równowagowa temperatura krystalizacji:

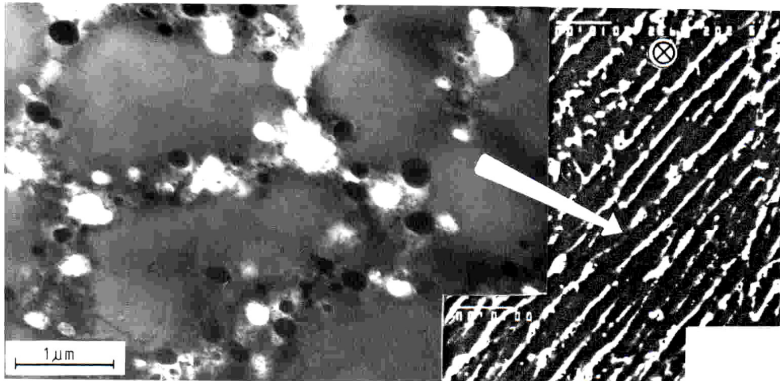
$$T_1(C_0) - T_1 = m(C_0 - C_1)$$

gdzie: $T_1(C_0)$ temperatura likwidus dla składu wyjściowego

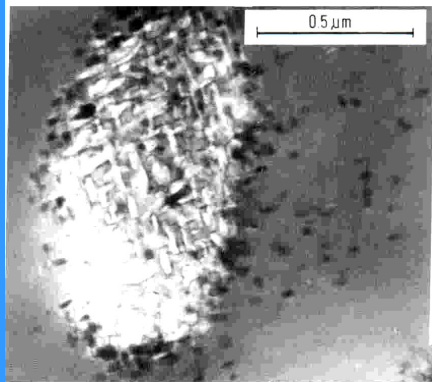
Gradient temperatury:

$$G = (dT_q/dz)_{z=0}$$

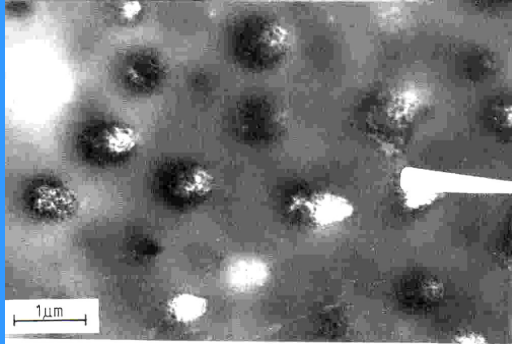




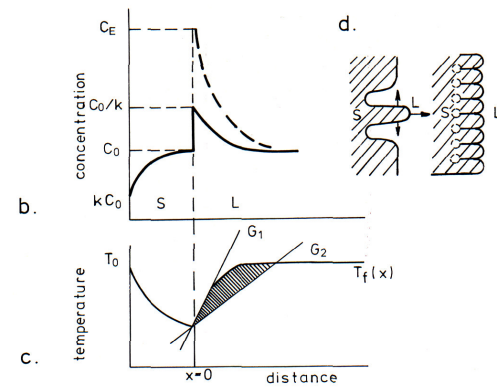
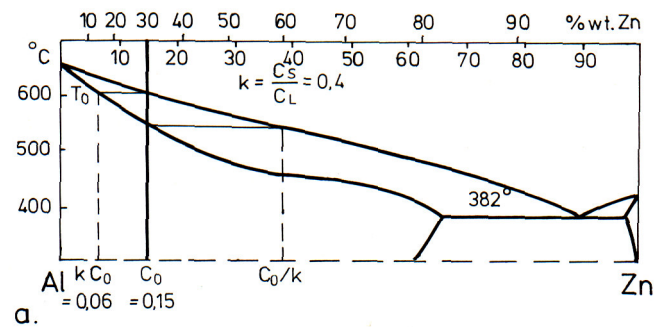
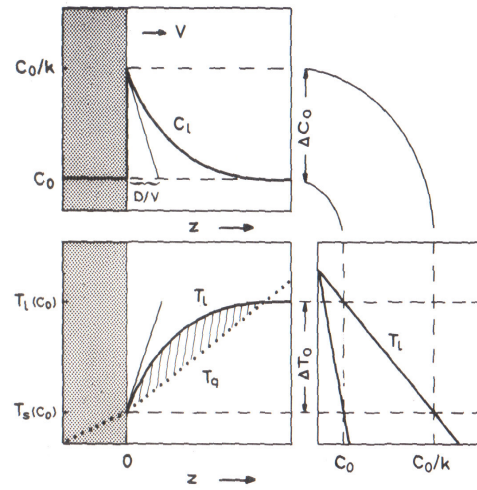
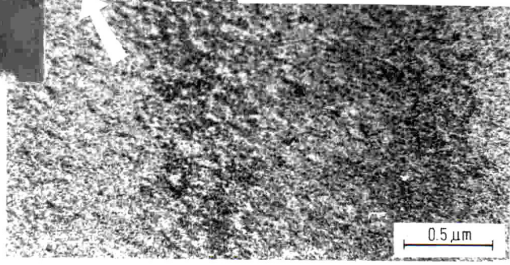
TEM



SEM



Al₃₀Zn



16. Szybkie laserowe protypowanie

Laser prototyping

- **Proces hybrydowy**

Laserowe natapianie + szybka obróbka nagniataniem

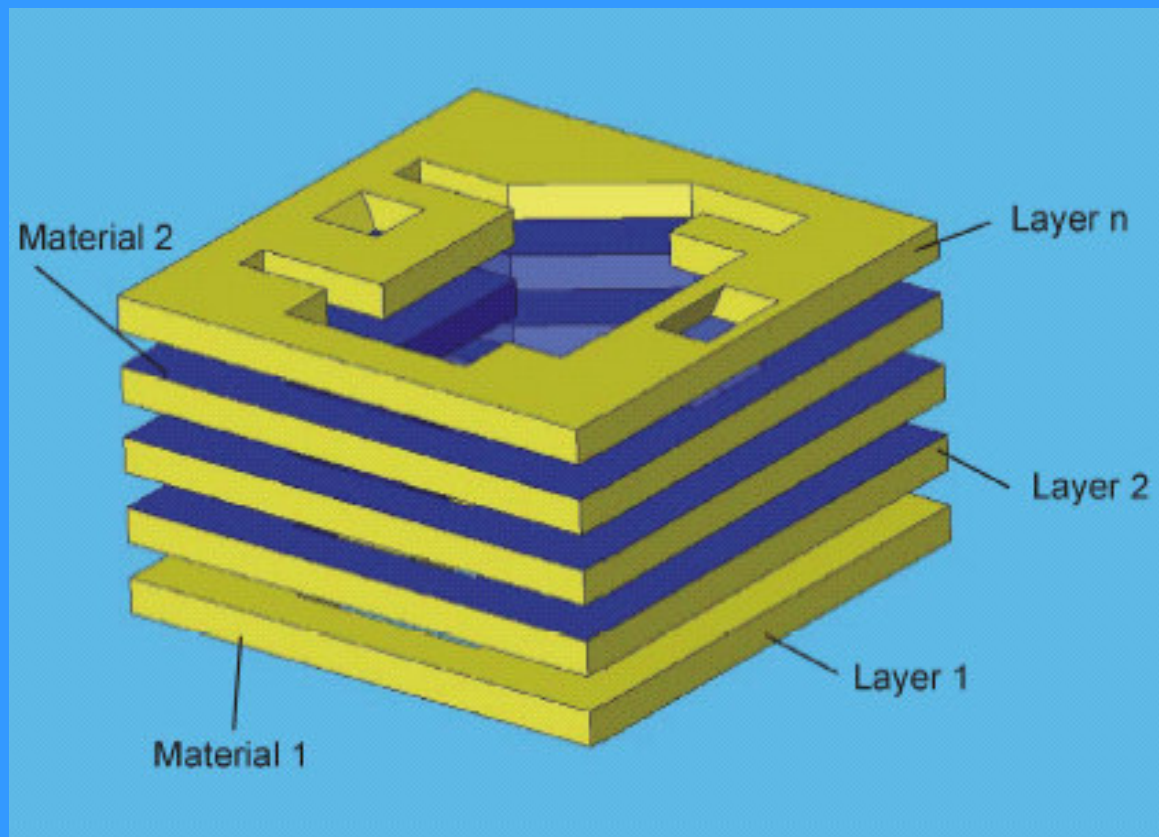
Hybrid manufacturing process

Laser cladding + high speed milling



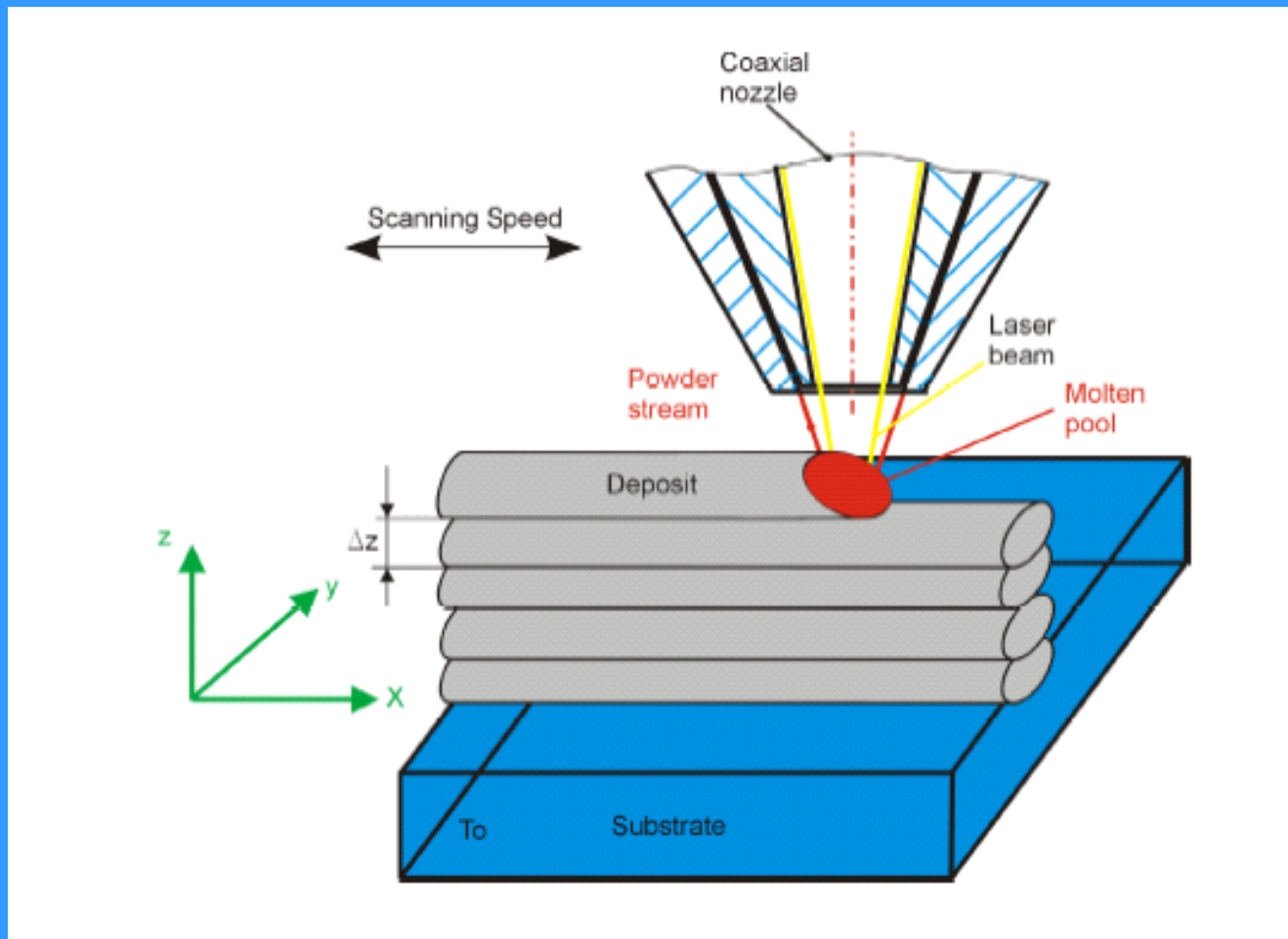
The Hybrid Concept

Combination of different metals within one part.

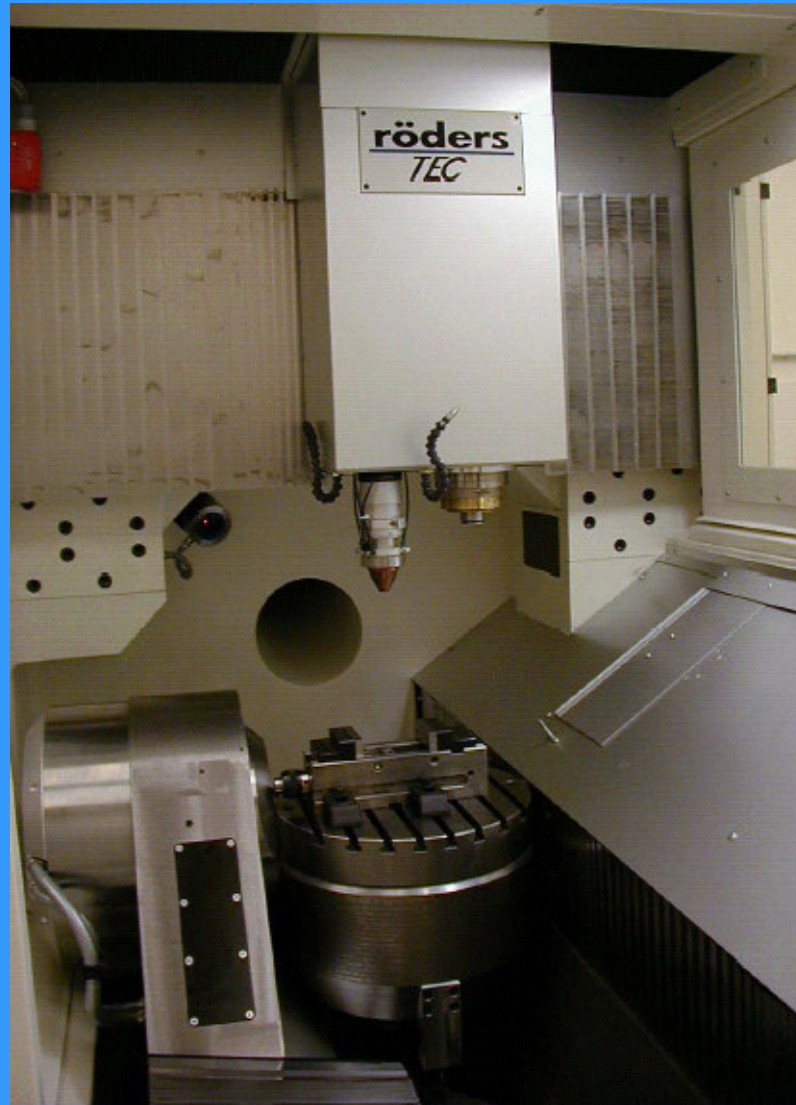


Introduction

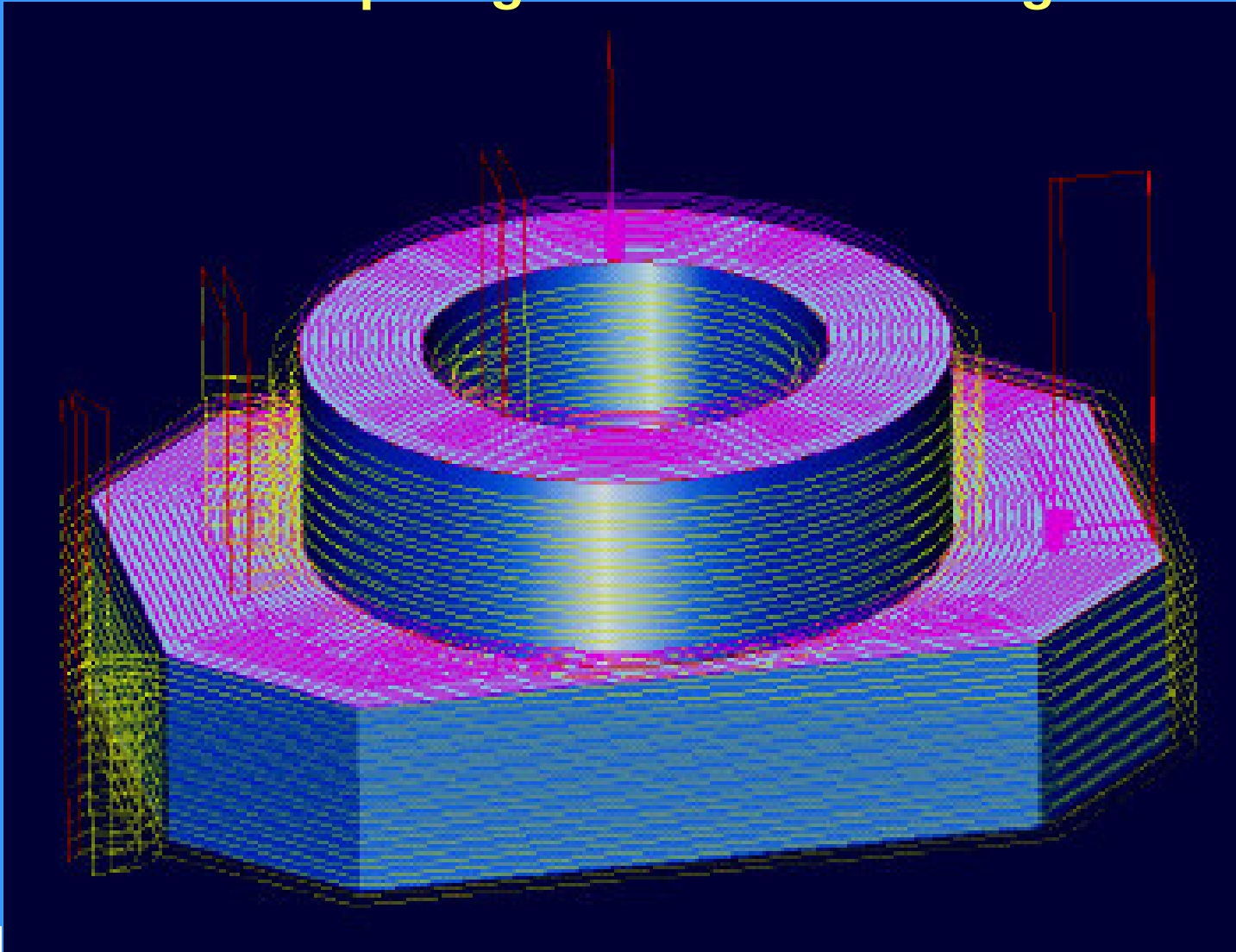
Schematic representation of the laser cladding process



HSC milling machine combined with a Nd:YAG laser cladding nozzle.

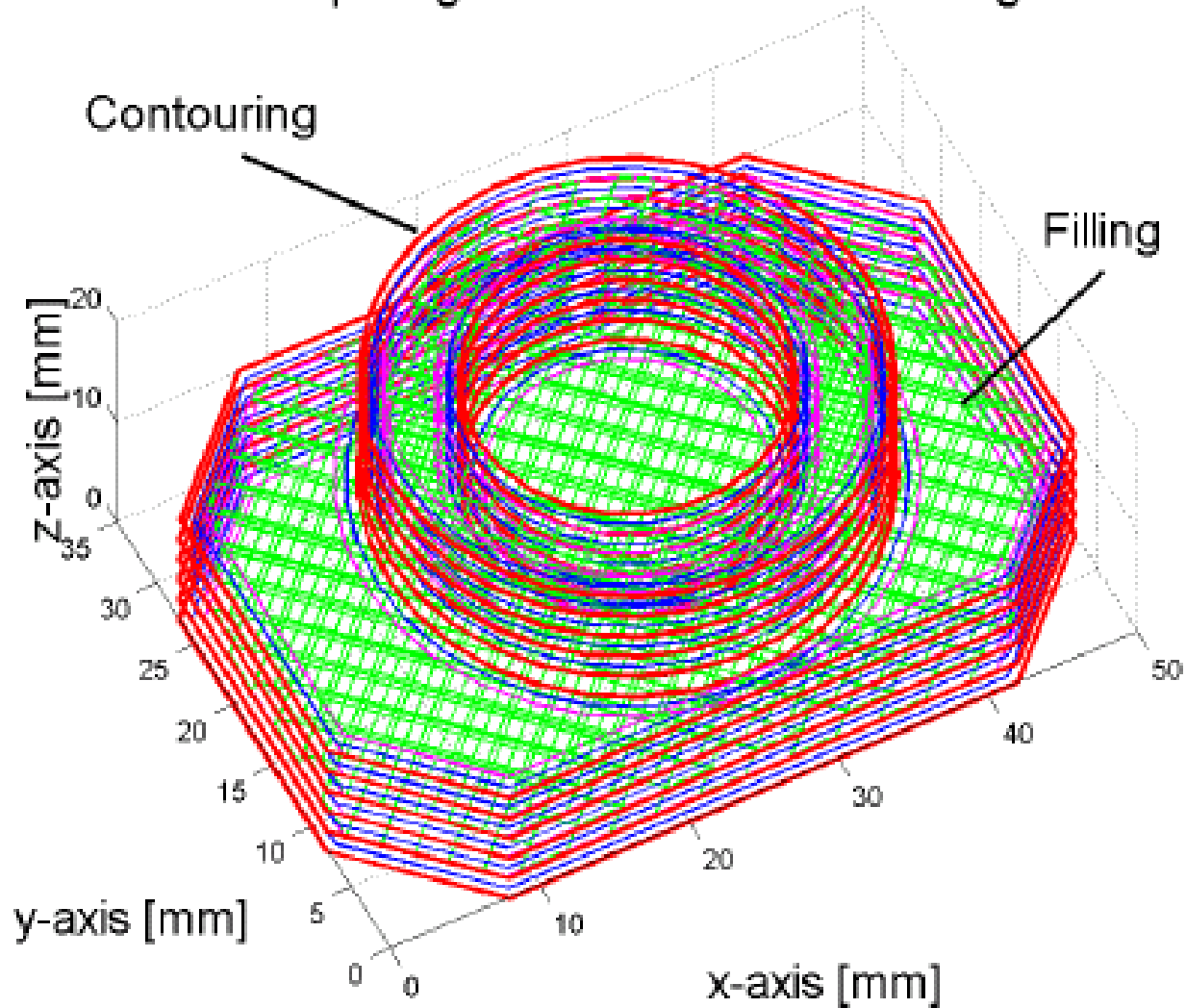


Tool path generation for milling



Tool path generation for LC

Toolpath generation for laser cladding



Results And Conclusions

Wineglass fabricated by 5-axis LC

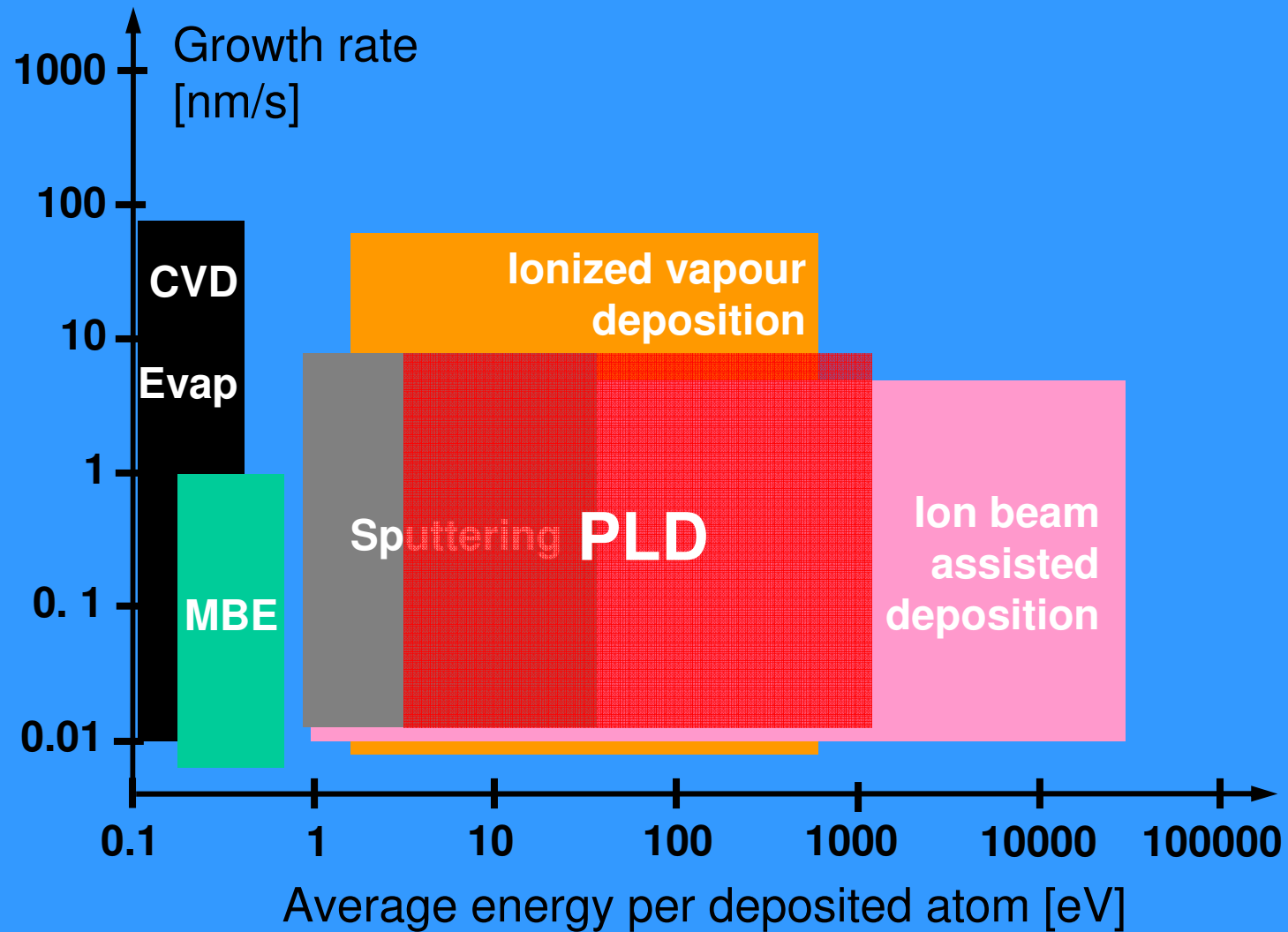


17. Osadzanie laserem impulsowym z wykorzystaniem ablacji laserowej

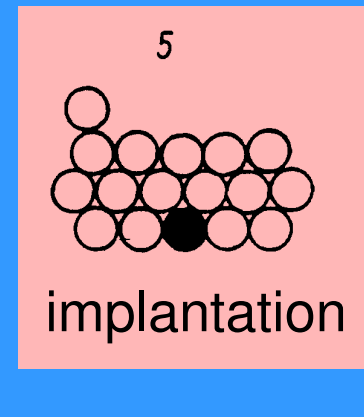
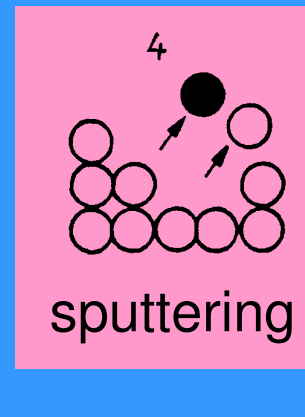
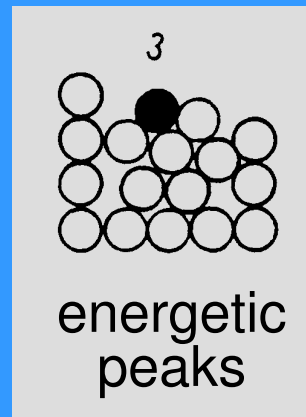
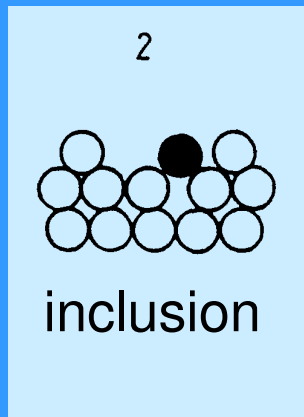
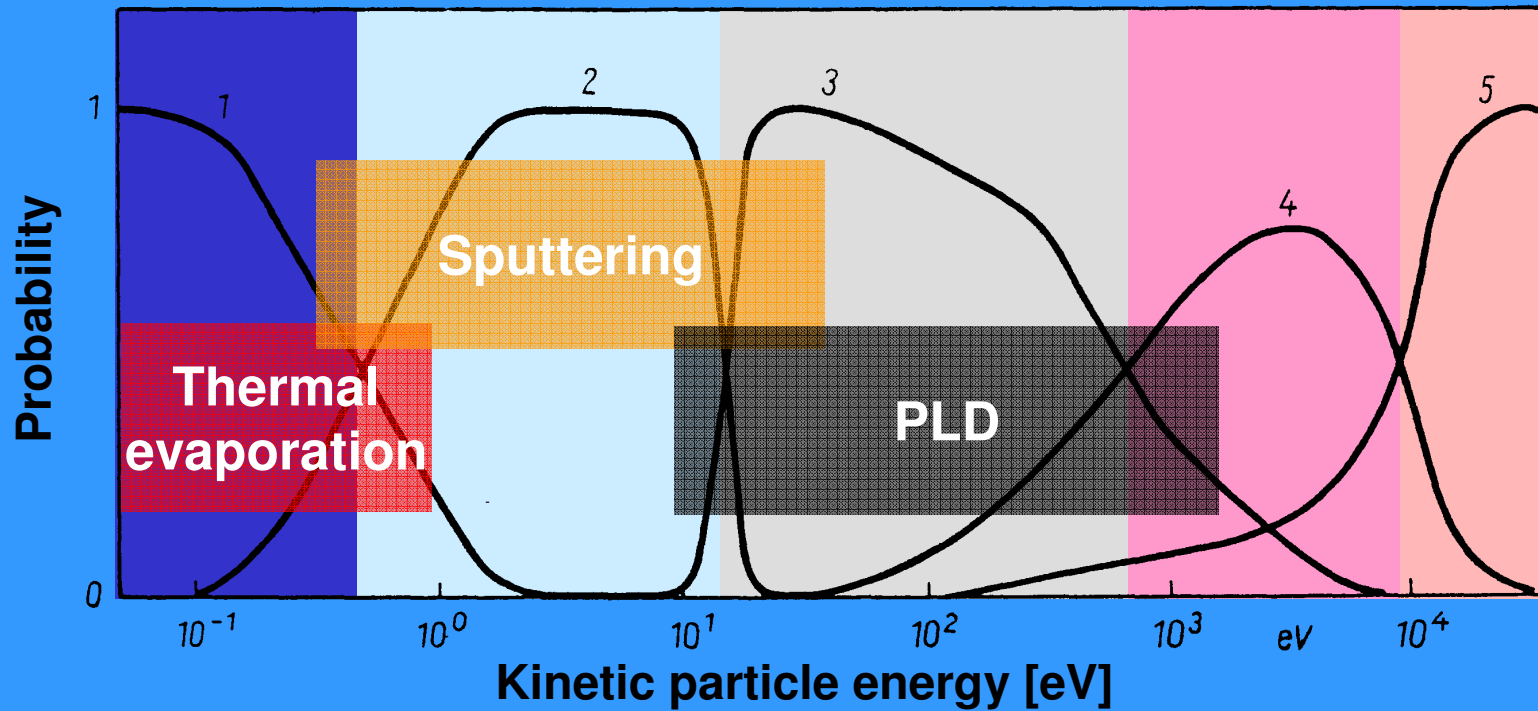
Metoda PLD (pulsed laser deposition)

Ablacja – proces, w którym wysokoenergetyczne kwanty promieniowania laserowego wywołują obniżenie energii wiązań pomiędzy cząstkami, co umożliwia zdejmowanie warstw atomowych jedna po drugiej

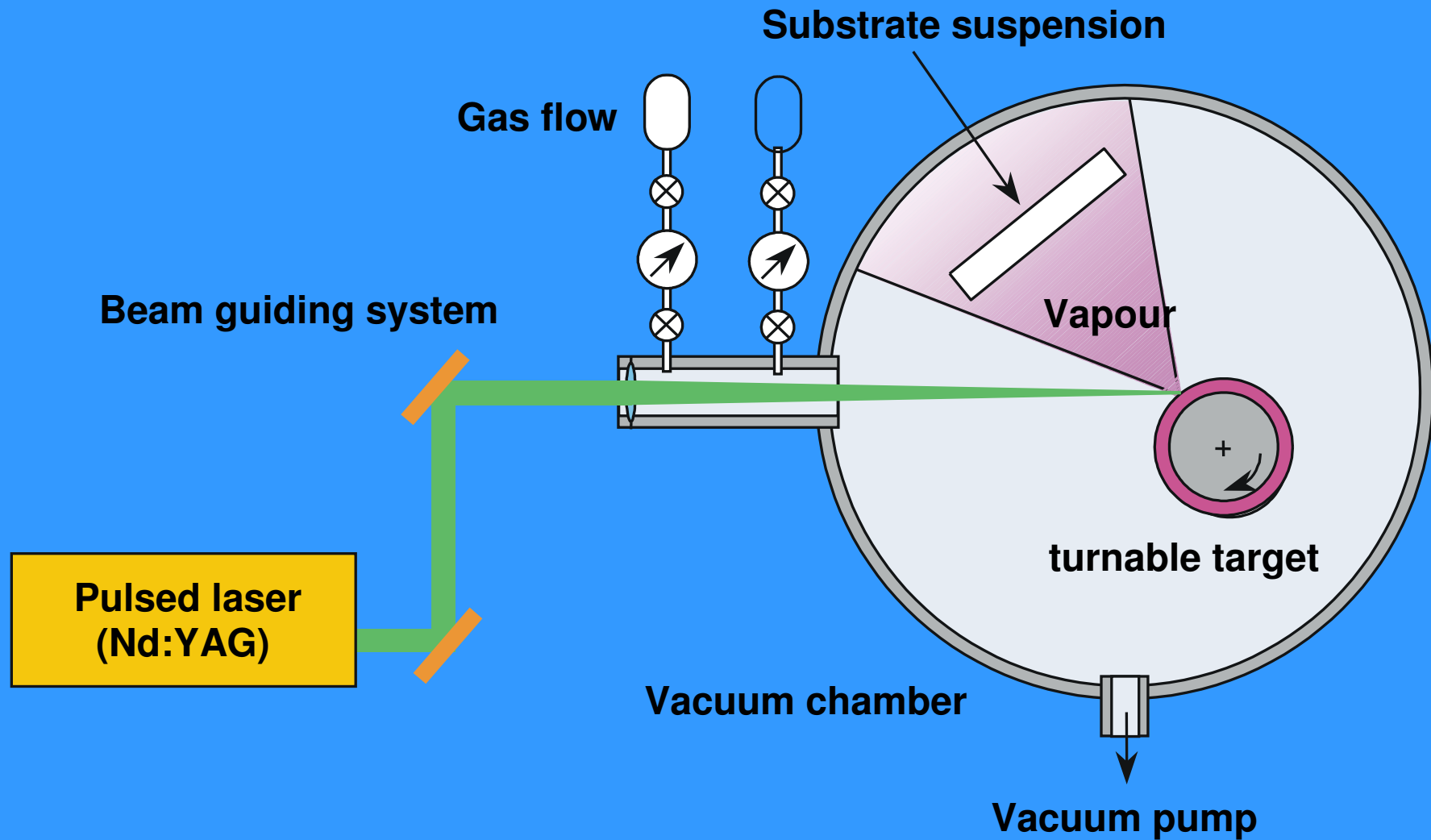
Vapour energy



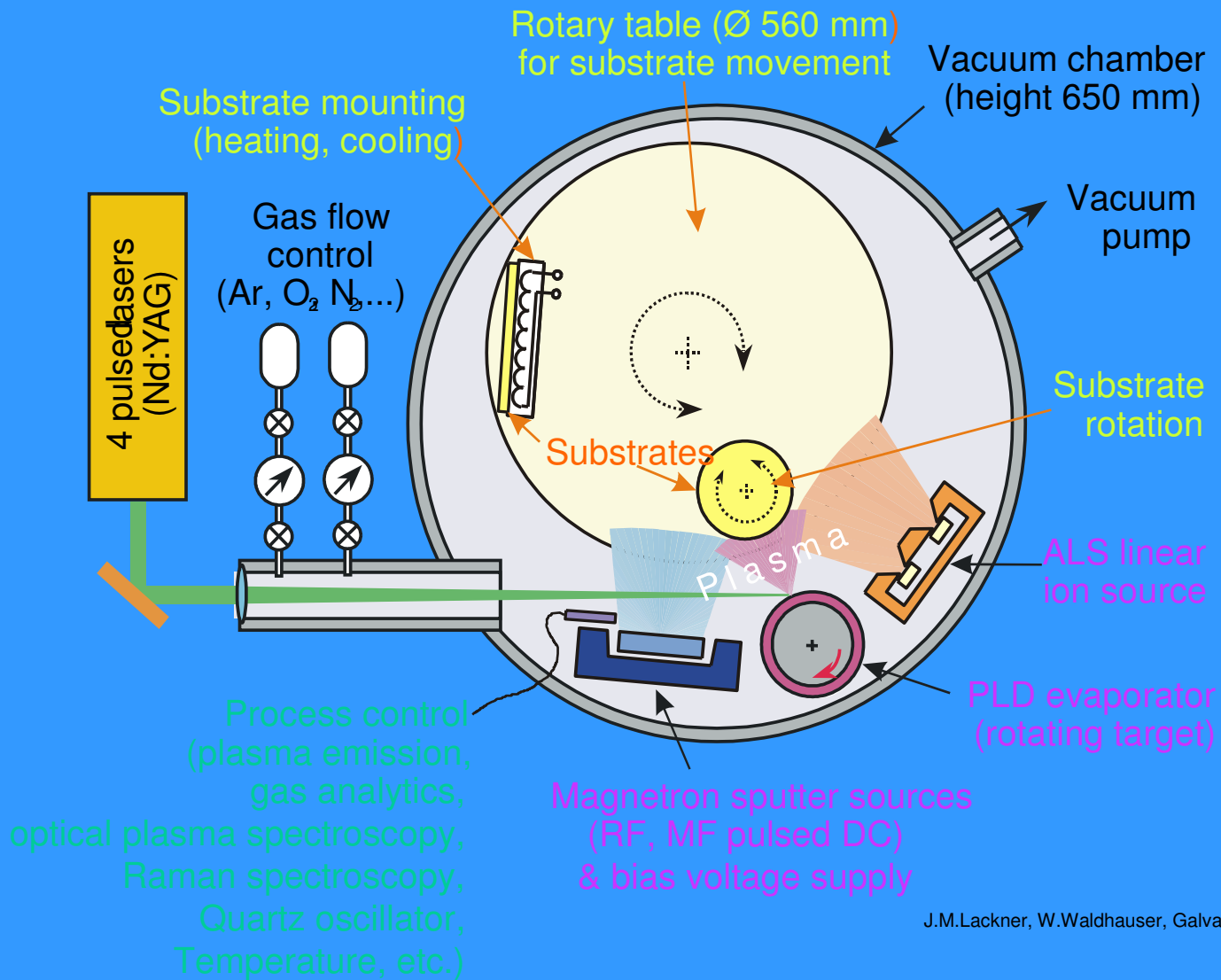
Energetic aspects in thin film growth



Pulsed Laser Deposition



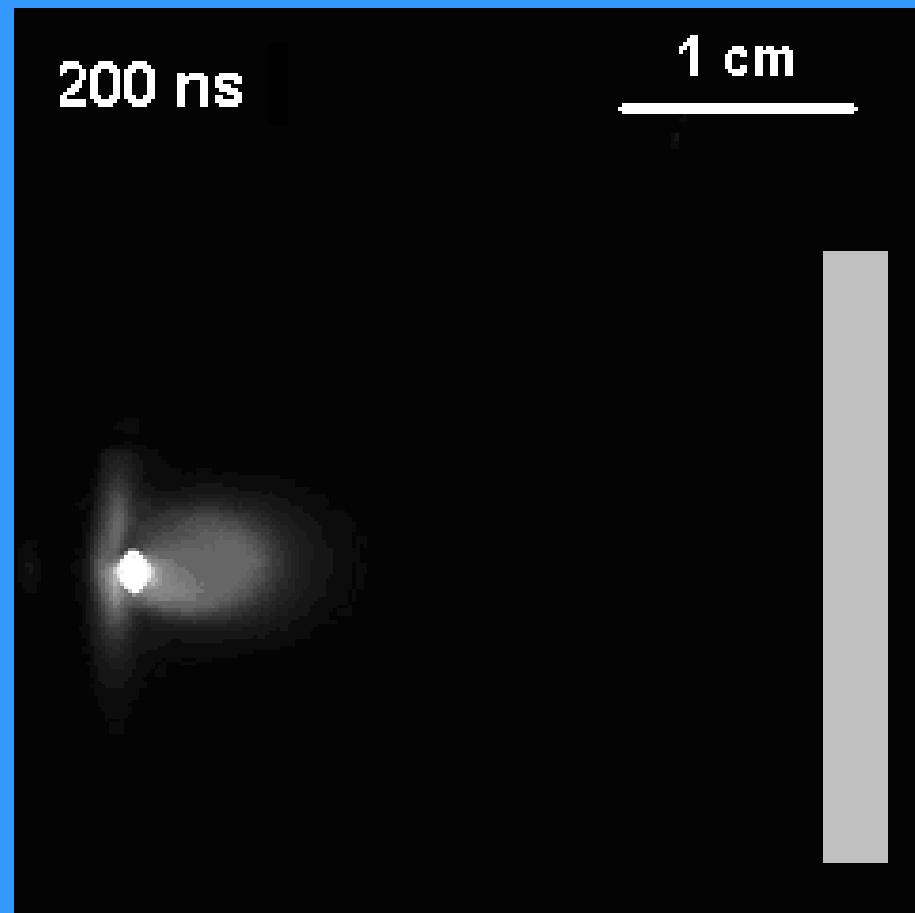
HybridPLD coating system



CHAMBER ENVIRONMENT INTERACTION ON THE SHAPE OF THE PLASMA FLOW

Titanium target ablation in the vacuum
 10^{-5} mbar (10^{-3} Pa)

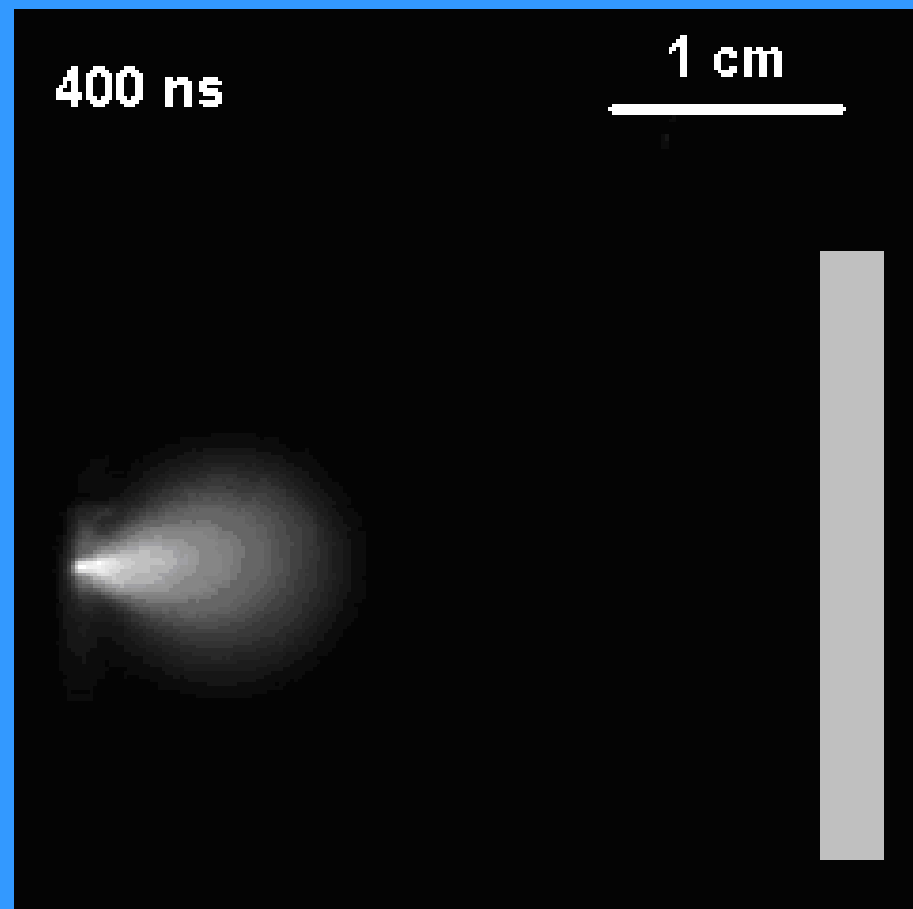
Plasma plume flow as a function of time (CCD registration)



CHAMBER ENVIRONMENT INTERACTION ON THE SHAPE OF THE PLASMA FLOW

Titanium target ablation in 5 Pa (5×10^{-2} mbar) pressure

Plasma plume flow as a function of time (CCD registration)



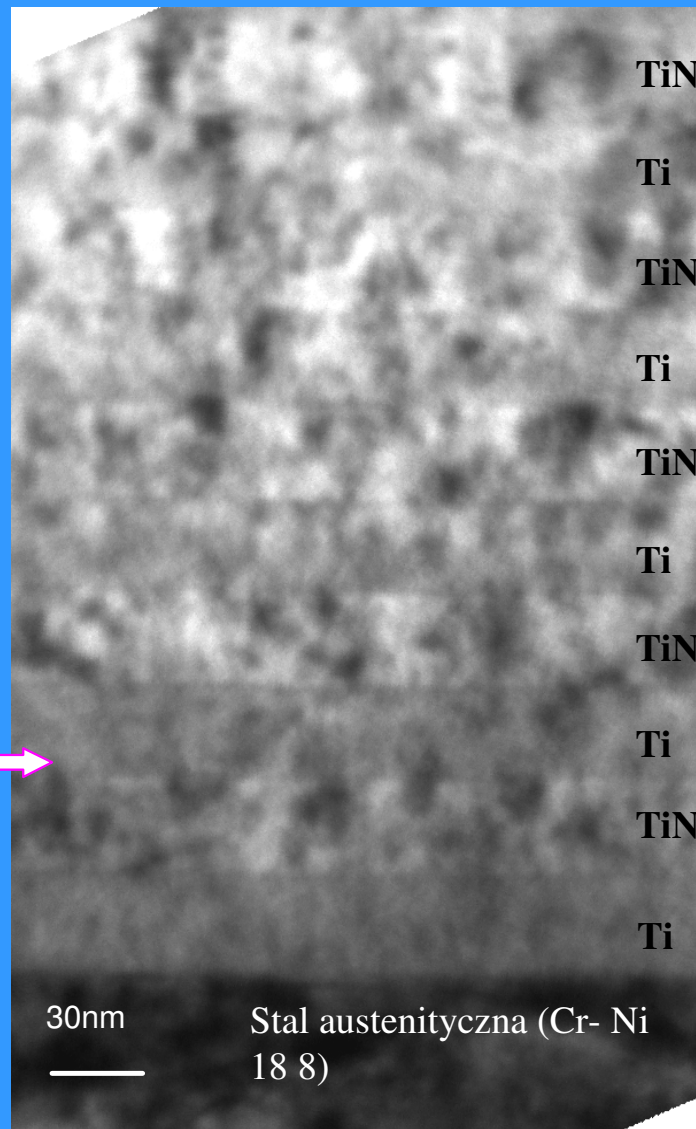
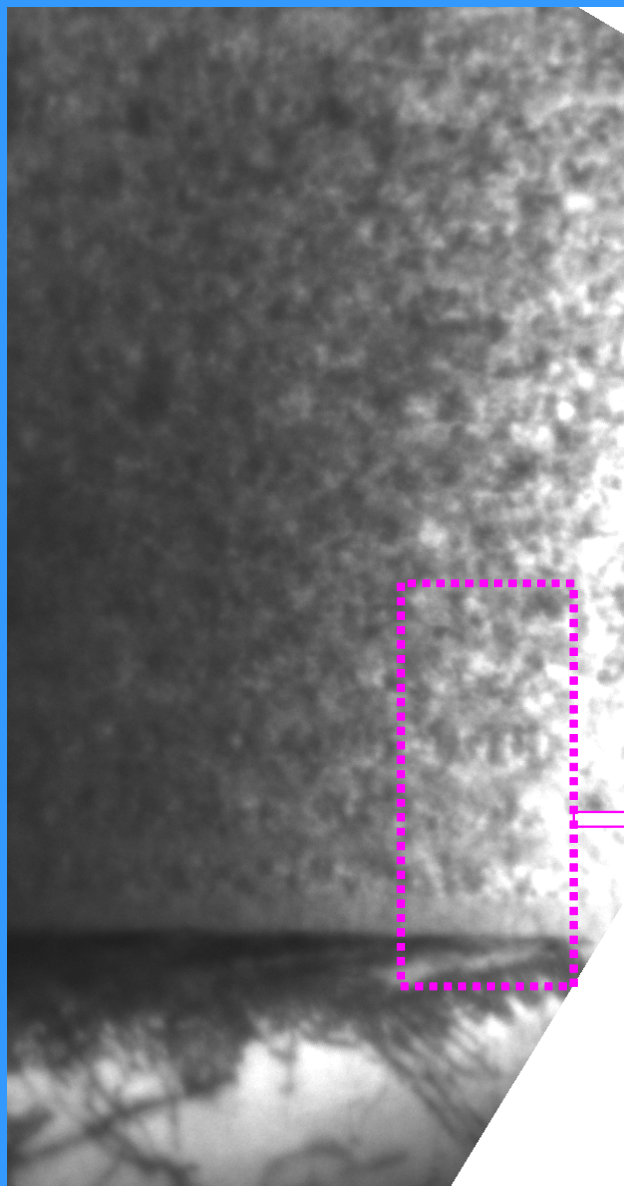
Advantages of PLD

1. high local temperatures on target surface
→ large number of coatings materials
2. short laser pulses
→ congruent evaporation of the target material
3. evaporation in vacuum without the use of crucibles
→ high purity of coatings
4. high kinetic energies of the vaporised particles
→ improved adhesion, extremely fine structure
5. very low substrate temperatures possible
→ coating of temperature sensitive parts

Procesy fizyko-chemiczne podczas transportu odparowanej strugi

- (i) Energia uderzających cząstek po przelocie i rekombinacji cząstek zjonizowanych wiąże się głównie ze zmianą ich dynamiki wzdłuż osi strugi
- (ii) Rozkład cząstek w strudze posiada silne maksimum względem osi strugi
- (iii) Gdy ablacja zachodzi w próżni to tworzące się aglomeraty w przypadku tarczy wieloskładnikowej w zależności od warunków energetycznych posiadają skład kompatybilny z tarczą
- (iv) Gdy ablacja zachodzi w gazie zachodzi dysocjacja cząstek podstawowych prowadzący do reakcji pomiędzy atomami
- (v) Podczas ekspansji strugi w gazie dochodzi do kolizji pomiędzy atomami prowadząc do włączenia obcych cząstek i utworzenia aglomeratów których skład jest kompatybilny ze stechiometrią tarczy

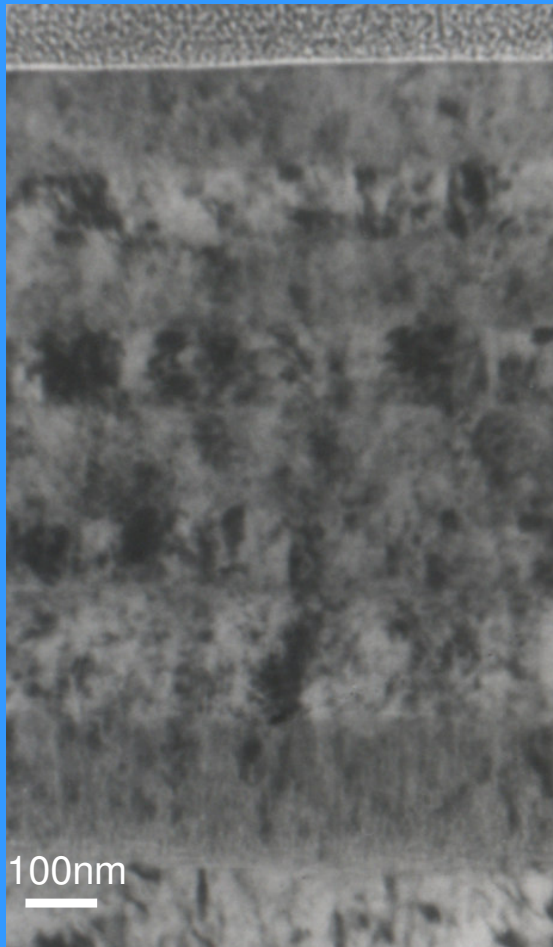
Ti/TiN- 32 layers



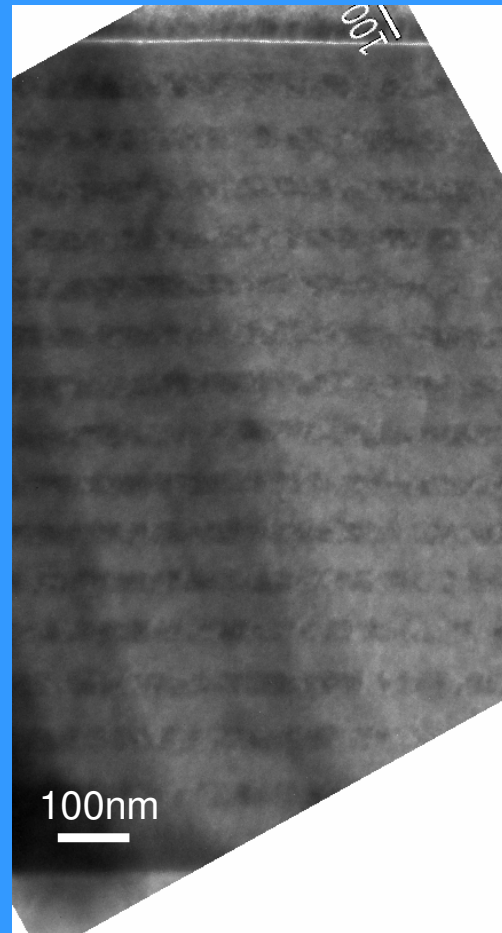
Cr/CrN

8- layers

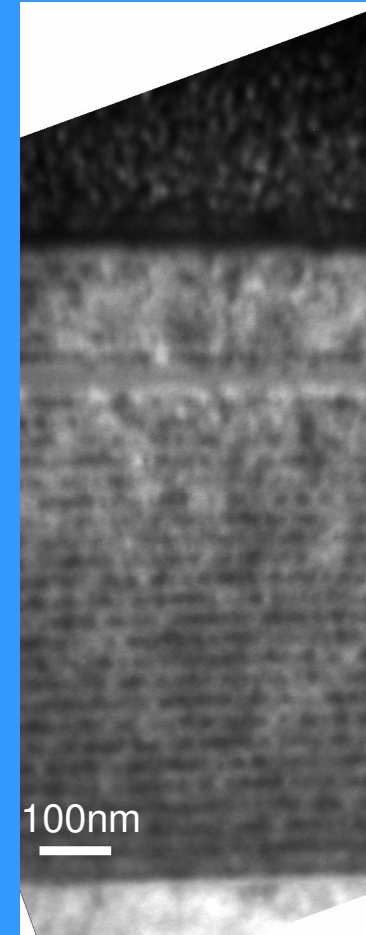
CrN
Cr
CrN
Cr
CrN
Cr
CrN
Cr



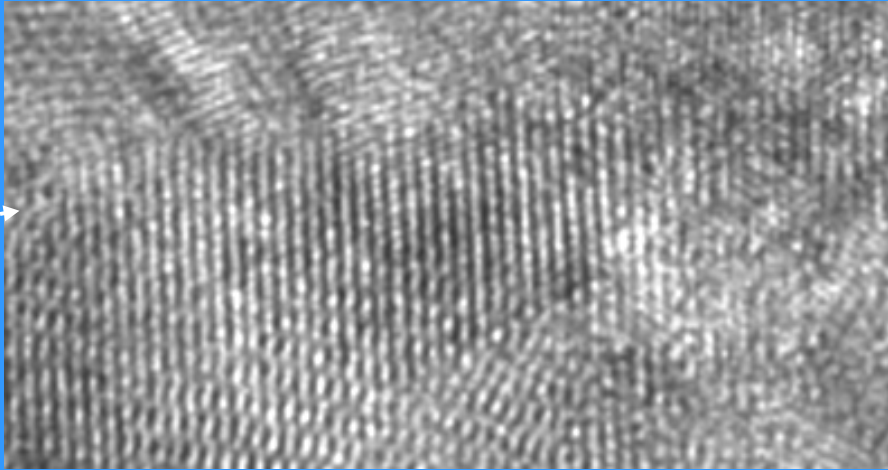
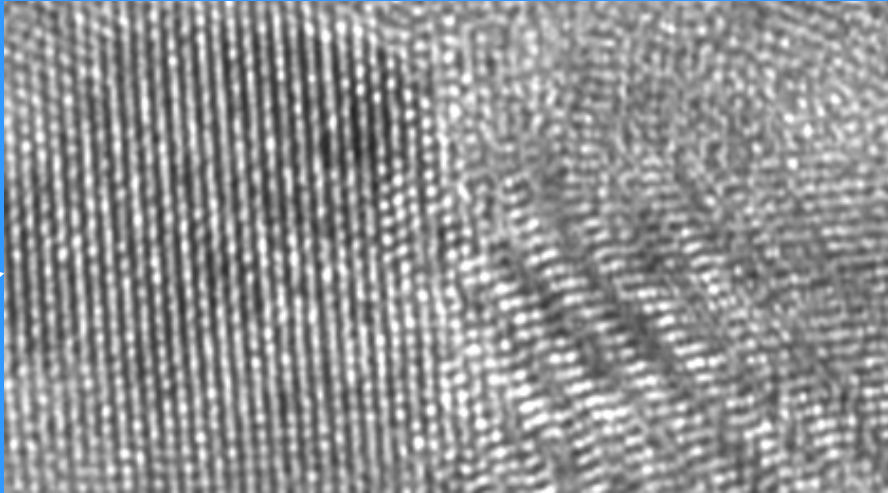
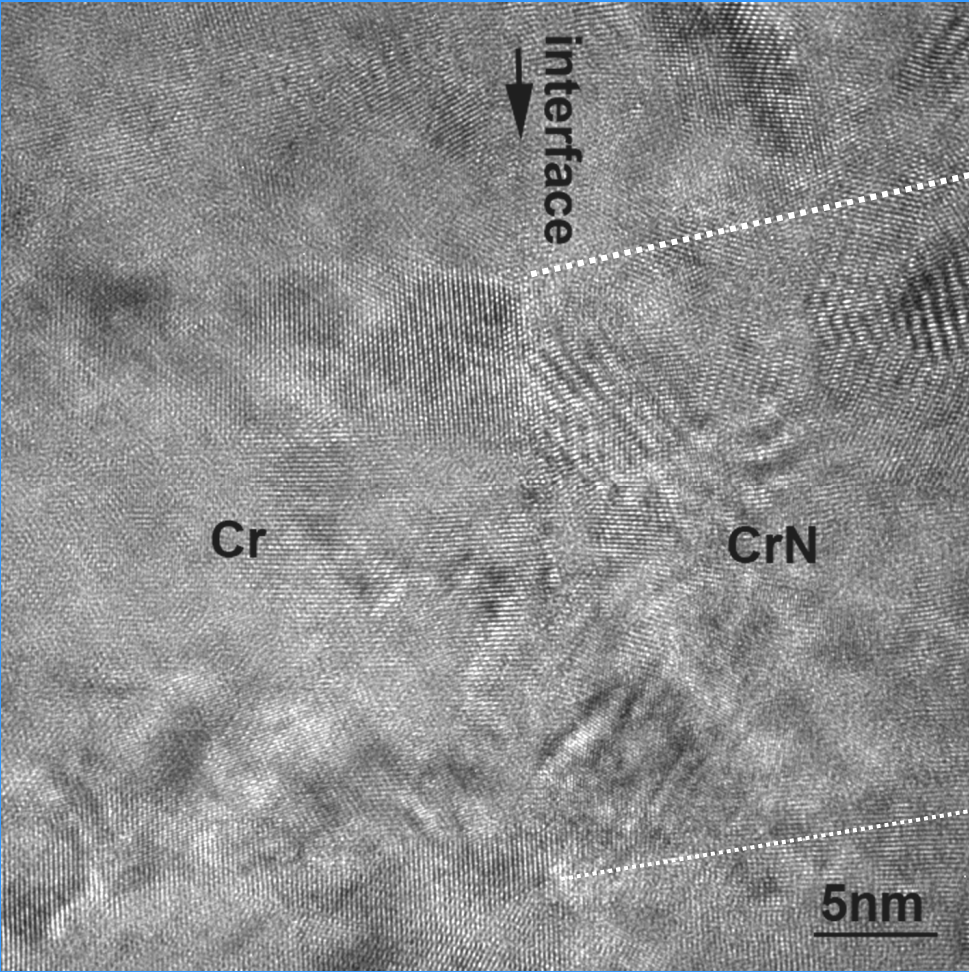
32- layers

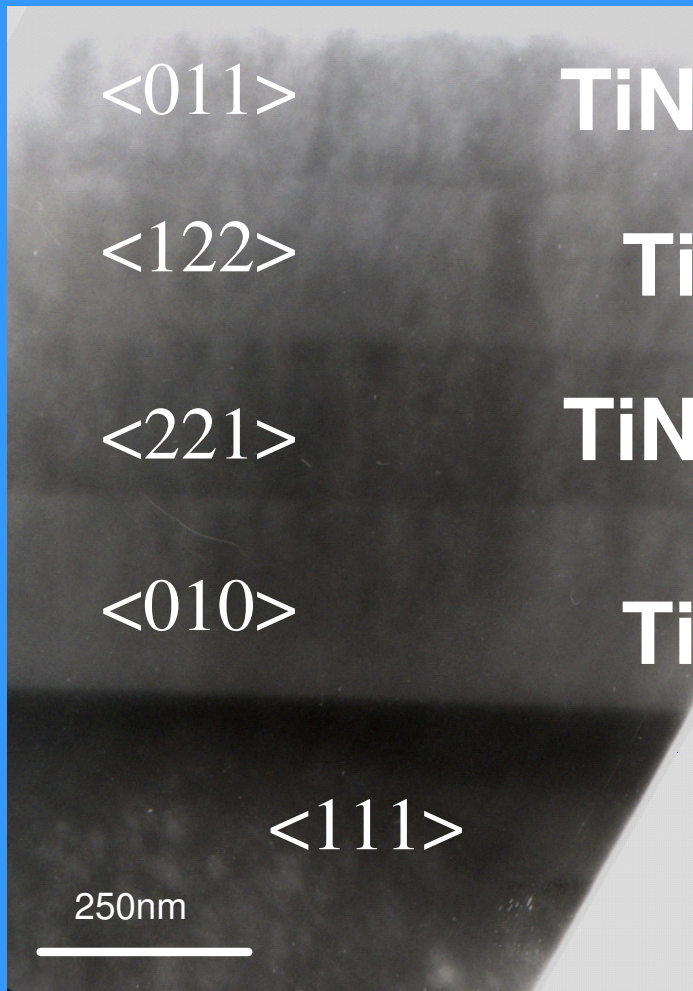


64- layers



Cr/CrN- 8 layers (HRTEM)



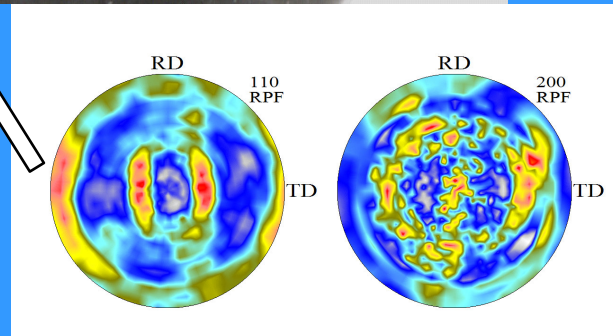
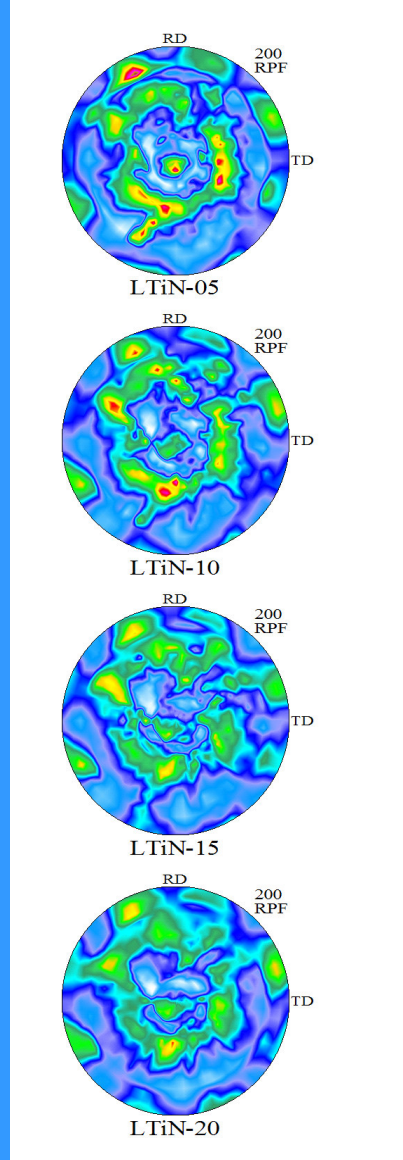
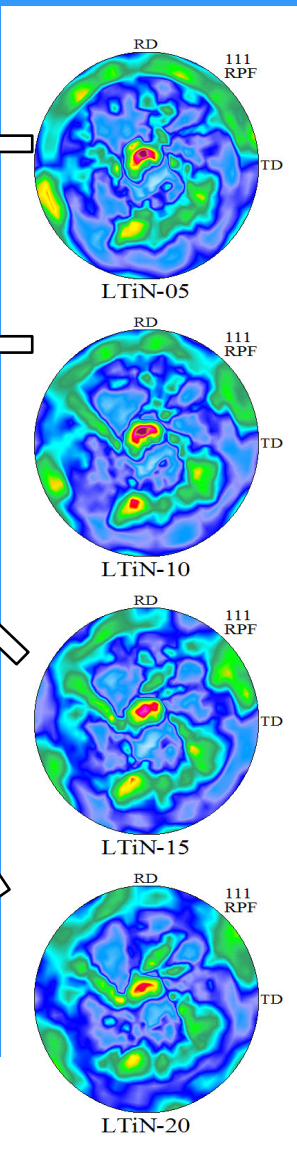


TiN

Ti

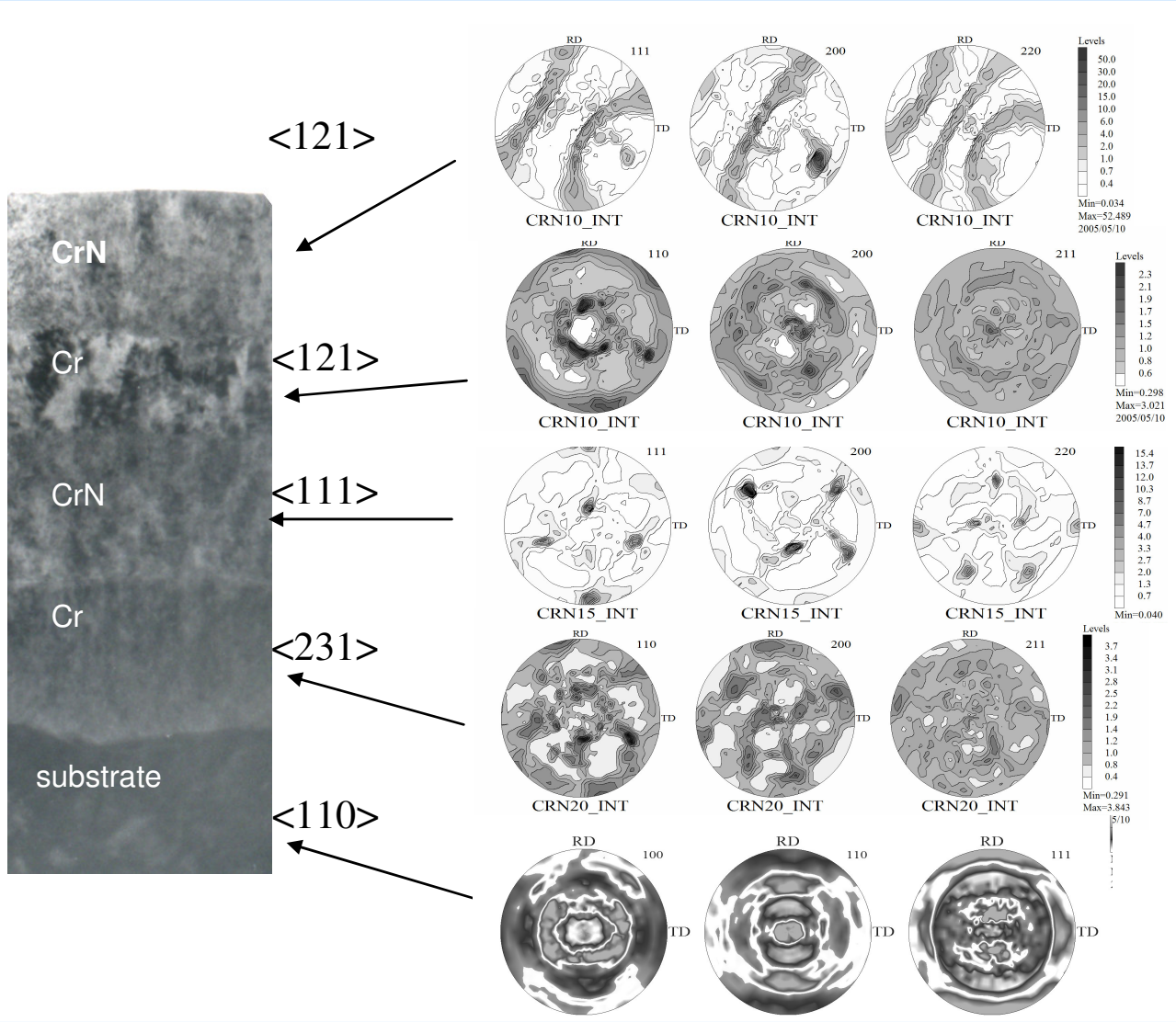
TiN

Ti



Ti/TiN- X-ray texture tomography

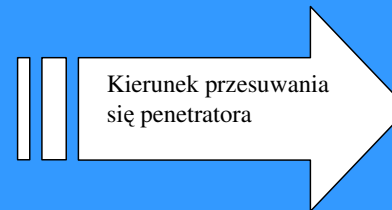
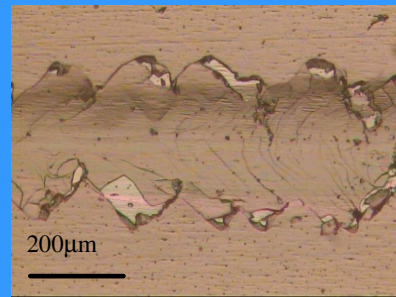
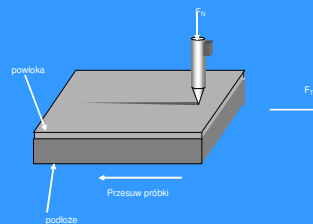
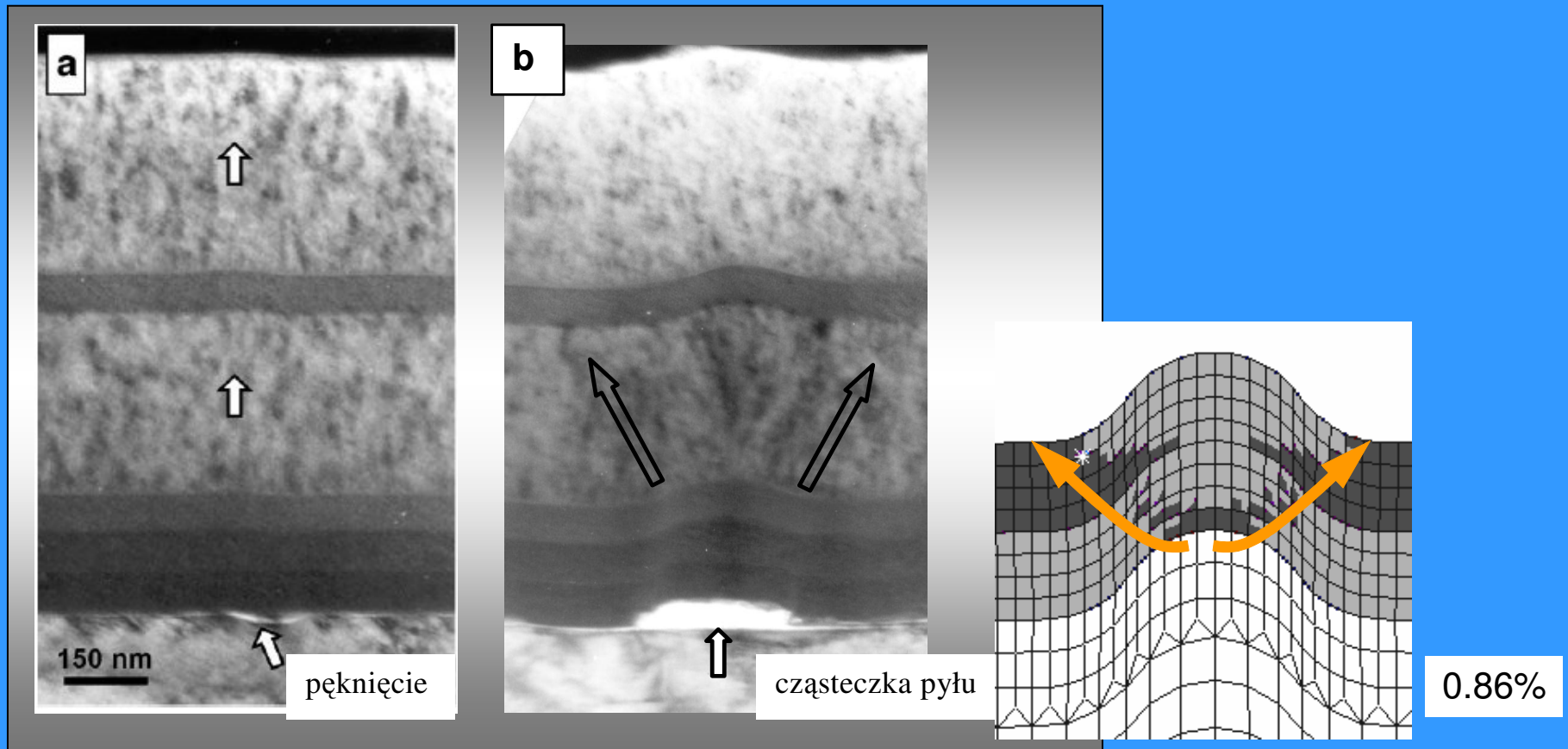




Cr/CrN- X-ray texture tomography



Cr/CrN- 4 layers (defect)



$$L_c = 3N$$

18. Czyszczenie powierzchni z wykorzystaniem ablacji laserowej

Główne mechanizmy odpowiedzialne za ablację:

- Rozpylanie kolizyjne
- Rozpylanie termiczne
- Rozpylanie elektronowe
- Rozpylanie rozwarstwieniowe
- Rozpylanie hydrodynamiczne

Renowacja dzieł sztuki laserem impulsowym – selektywne usunięcie warstwy wierzchniej zanieczyszczeń przy minimalnej ingerencji w obszary bezpośrednio do niej przylegającej

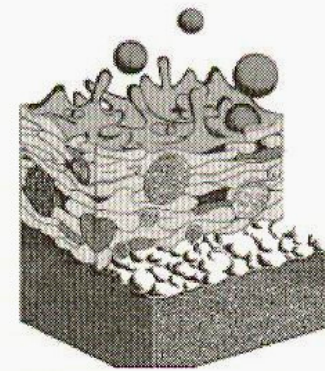
19. Modyfikacja powierzchni plamą termiczną

Plazma termiczna

tworząca się podczas wyładowania stało-prądowego (dc) lub generowanego częstotliwości a radiową (RF) przy ciśnieniu atmosferycznym oraz ciśnieniu zredukowanym (pomiędzy 10 i 50 KPa) wykorzystywana jest szeroko stosowana w inżynierii powierzchni od lat 60-tych

Osadzanie z wykorzystaniem plazmy (natrysk plazmowy);

metaliczne i niemetaliczne cząstki są osadzone w stanie ciekłym lub półciekłym na podłożu (Pau 9.1)

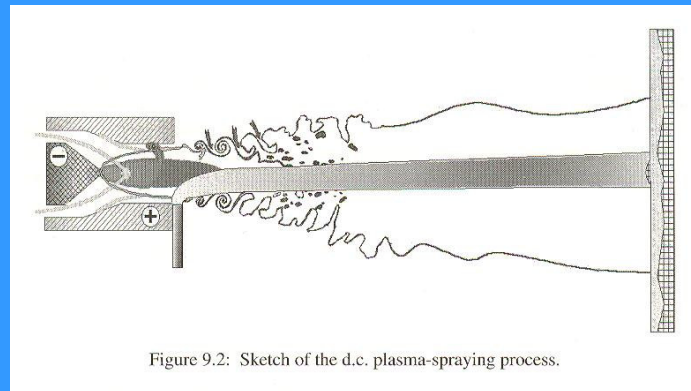


Sketch of the coating structure with splats, un-melted particles, voids, pores.

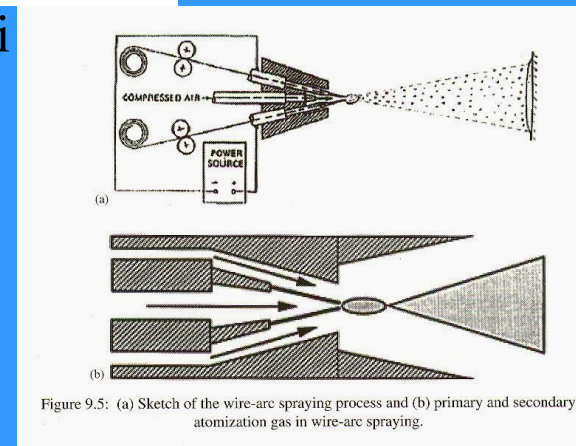
Rozróżnia się następujące systemy natrysku plazmowego:

- stałoprądowy (d.c)
- przy częstotliwości radiowej (RF)
- w łuku elektrycznym (podłoże jest elementem obwodu elektrycznego)
- dwu-drutowy (łuk pomiędzy dwoma drutami o ciągłym przesuwie)

Schemat procesu stało-napięciowego (Pau 9.2)



Schemat procesu z łukiem pomiędzy drutami



Sferoidyzacja proszków

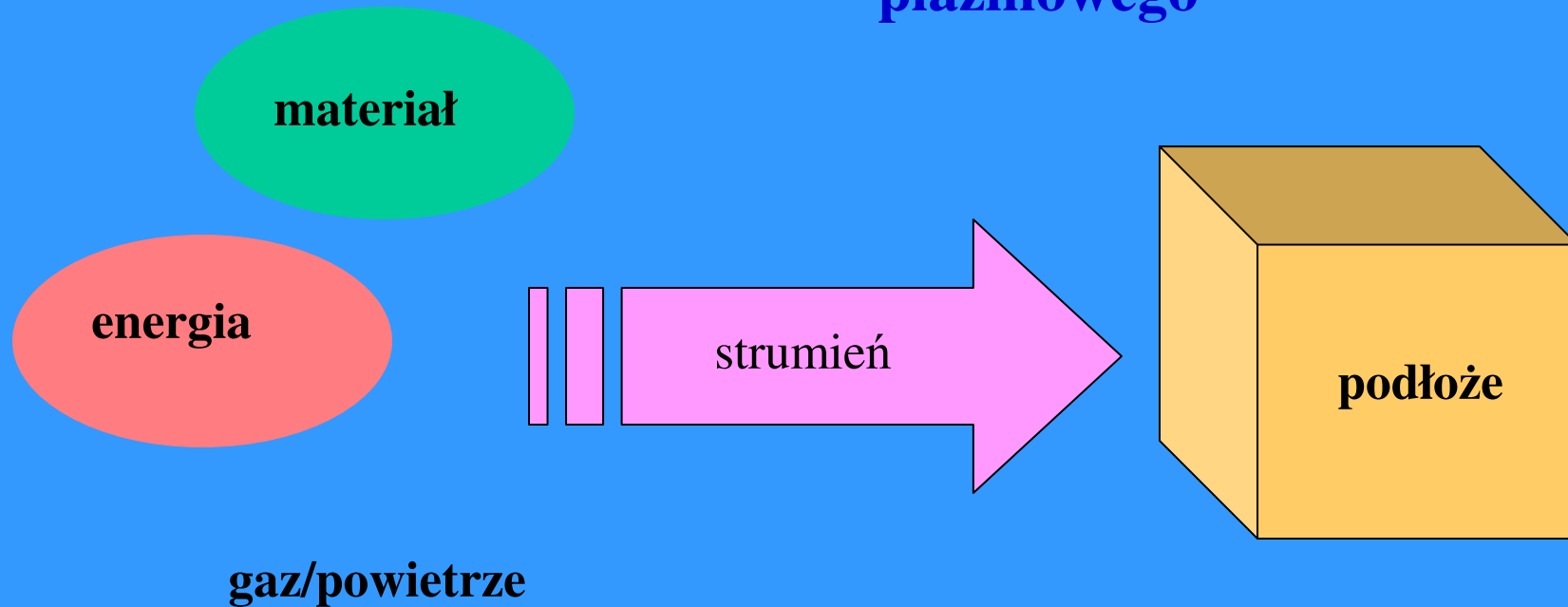
Proces prasowania (metalurgia proszków) wymaga sferoidalnych cząstek

- **Poprawa sypkości (podajniki zasilające układy)**
- **Wzrost gęstości (zmniejszenie porowatości warstw lub części)**
- **Eliminacja wgłębień i pęknięć**
- **Zmiany morfologii powierzchni; gładsza powierzchnia powoduje niższe zużycie cierne i kontaminację cząstek będących efektem efektów zużycia**
- **Poprawa czystości proszków poprzez selektywną reakcję/ odparowanie pewnych zanieczyszczeń**

Natryskiwanie plazmowe
- dziś i jutro

Pierwsze zastosowania techniki natryskiwania plazmowego - nakierowane na antykorozyjne zabezpieczenie blach stalowych przez ich **ocynkowanie ogniowe** - opracowane zostało przez Schoopa już z początkiem XX w.

Schemat procesu natryskiwania plazmowego



Podział technik natryskiwania plazmowego



**czasami w nazwach dodawana jest informacja o „ciśnieniu”*

Podsumowanie:

- niska szybkość nanoszenia/ słaba adhezja + duża porowatość / niski koszt
- wysoka szybkość nanosz. / dobra adhezja + mała porowatość / wysoki koszt

Klasyfikacja natryskiwanych plazmowo warstw pod kątem wykorzystaniem ich własności i zastosowań



**Przewodnictwa
cieplnego**



**Bariery
cieplne**



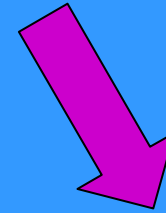
**„Mosty”
cieplne**



„Skrawalności”



**Samo-
uszczelnienia**



**Wytrzymałości
i twardości**



**Tarcie-
ścieranie**



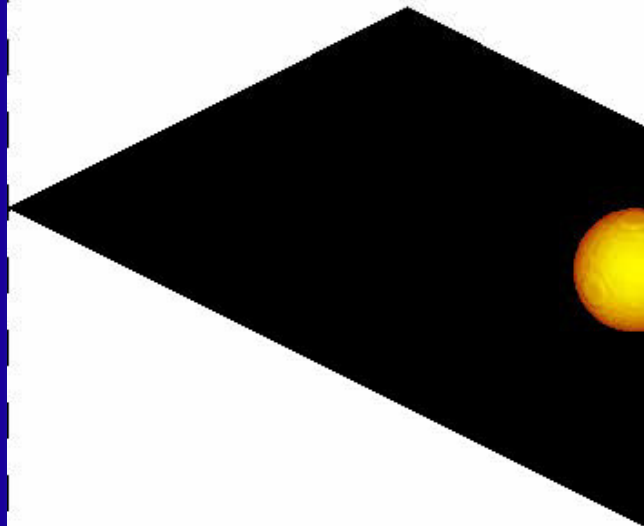
**Tarcie-
poślizg**



Sequential Impact of Two Nickel Particles

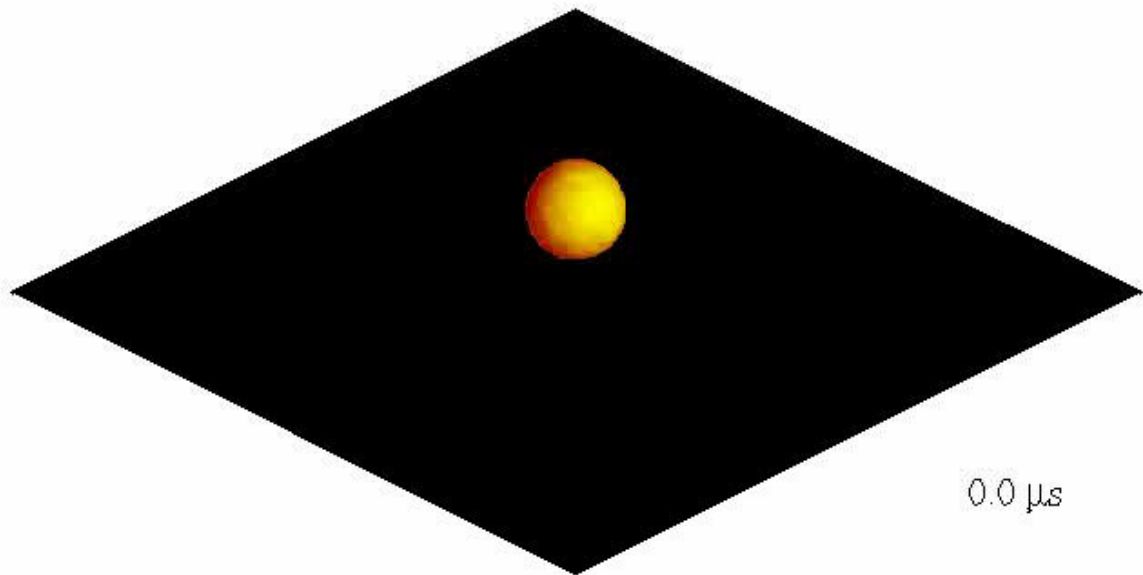
Diameter = 60 μm , Velocity = 40 m/s

$T_{d1}=2050^\circ\text{C}$, $T_{w1}=368^\circ\text{C}$, $R_c=5$



Multiple Impact of Nickel Particles on 0.5x0.5 mm Stainless Steel
Diameter = 40-80 μm , Velocity = 40-80 m/s, Impact time interval = 2 μs

$T_{d1}=1600-2000^\circ\text{C}$, $T_{w1}=20^\circ\text{C}$, $R_c=10^{-7} \text{m}^2\text{K/W}$



0.0 μs



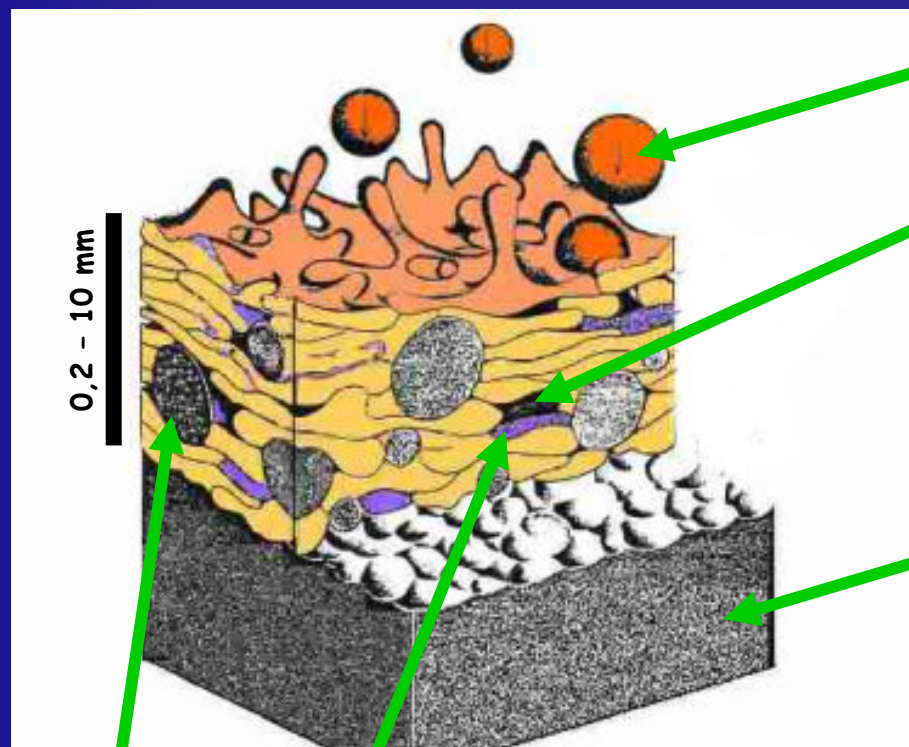
Metodami natryskiwania termicznego można uzyskać warstwy charakteryzujące się:

- dużą odpornością na ścieranie, wysoką temperaturę i korozję
- określonymi parametrami termicznymi (*Thermal Barrier Coatings* - powłoki izolujące termicznie)
- biokompatybilnością (hydroksyapatyt - natr. plazmowe, amorficzna 30 - 200 um)

Ponadto uzyskuje się:

- warstwy przewodników jonów w ogniwach (Solid Oxygen Fuel Cells). (porowate elektrody i gęste membrany)
- regenerację zużytych części maszyn, aparatury chemicznej, powłoki dekoracyjne

Istnieje możliwość natryskiwania wielowarstw (np. w celu zniwelowania różnicy współczynników rozszerzalności cieplnej podłoża i warstwy nanoszonej) oraz uzyskiwanie materiałów gradientowych (FGM Functionally Graded Material) o gradiencie składu, wielkości ziaren, porowatości.



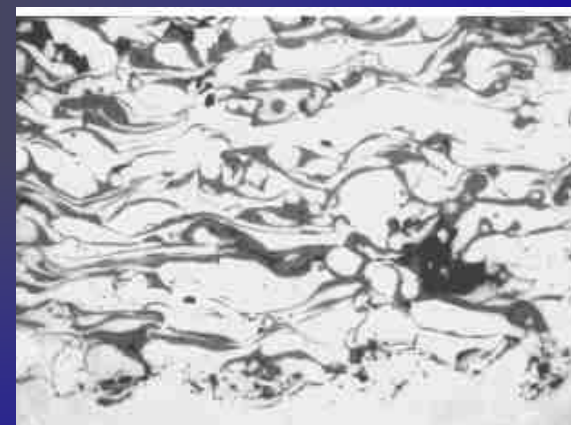
NIEROZTOPIONA CZĄSTKA

WTRĄCENIE TLENKOWE

CZĄSTECZKA

PUSTKA

PODŁOŻE



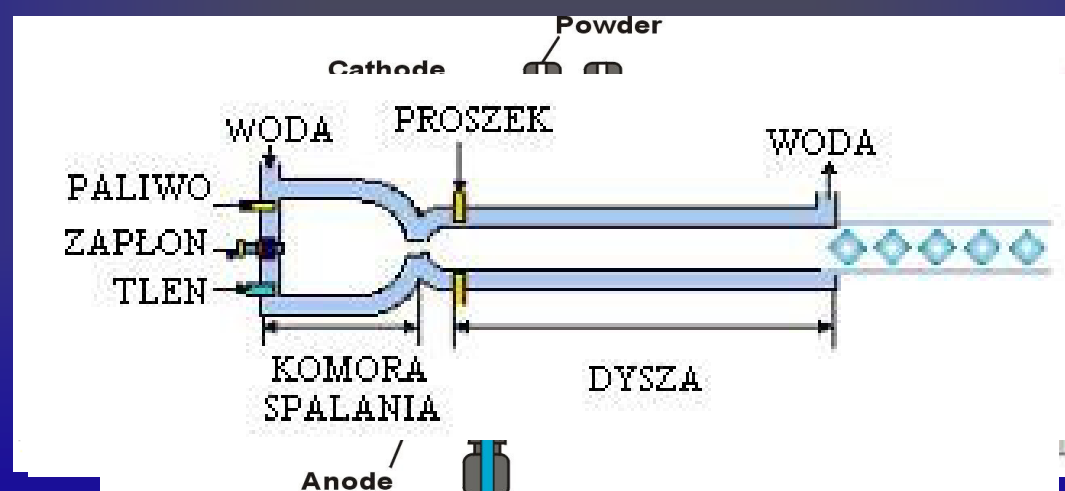
Typowa mikrostruktura powierzchni

Analiza warstw: mikroskopia optyczna, SEM, EDX, metody analizy obrazu



Porównanie kilku metod natryskiwania

	Szybkość cząstek [m/s]	Adhezja [Mpa]	Zawartość tlenków [%]	Porowatość [%]	Prędkość nanoszenia [kg/h]	Typowa grubość powłoki [mm]
Płomieniowe	40	<8	10 - 15	10 - 15	1 - 10	0,2 - 10
Łukowe	100	10 - 30	10 - 20	5 - 10	6 -60	0,2 - 10
Plazmowe	200 -300	20 -70	1 - 3	5 - 10	1 - 5	0,2 - 2
HVOF	600 - 1000	>70	1 - 2	1 - 2	1 - 5	0,2 - 2
Detonacyjne	800 - 1000	>70	0,1	0,1 - 1	1 - 2,5	bd





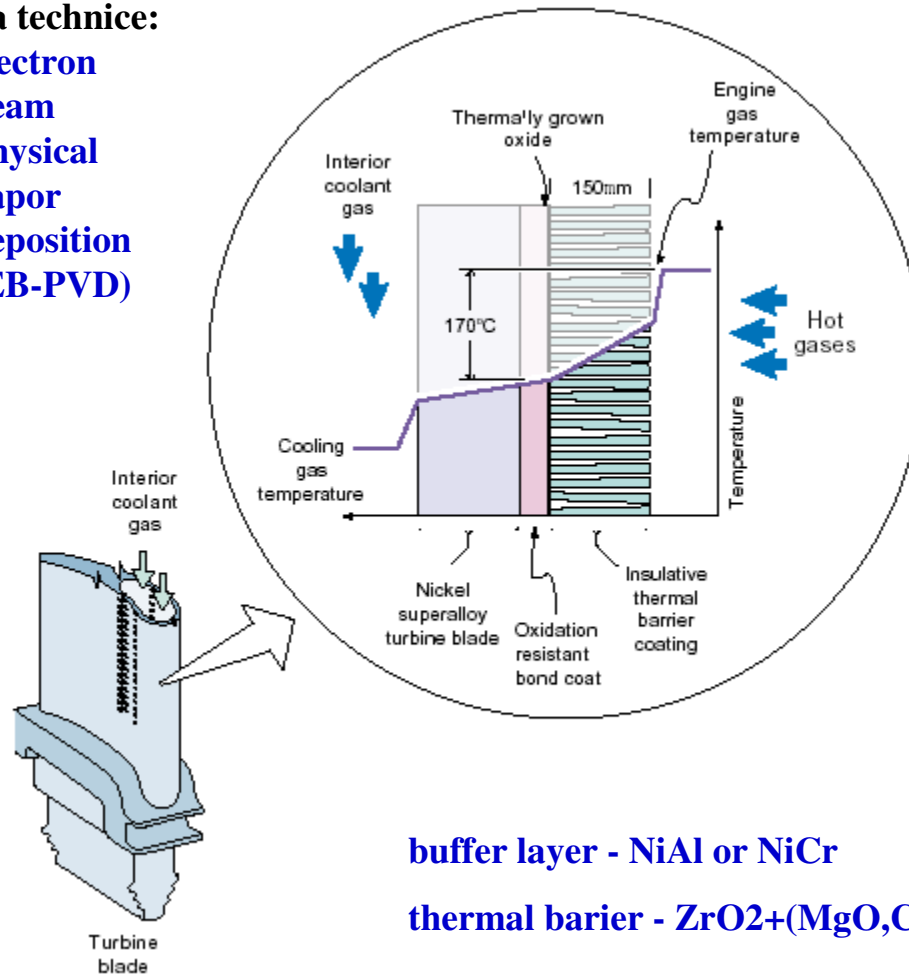
Charakterystyka uzyskiwanych powłok:

- możliwość nanoszenia warstw metali (Ti), stopów (NiCr), ceramiki (Al_2O_3), cermetów (C_{graf} pokryty powierzchniowo Ni) węglików (Cr_2C_3)
- nanoszone warstwy mogą być grube
- wiązanie warstwa - podłoża jest mechaniczne, adhezyjne lub dyfuzyjne (nie występuje nadtopienie powierzchni podłoża)
- możliwe jest natryskiwanie materiałów i podłoży metalurgicznie niezgodnych ($T_1 > T_2$)
- tanio, łatwo i szybko nanoszone powłoki regenerujące części urządzeń są wytrzymałe (zwiększenie żywotności maszyn)

Warstwowe bariery termiczne



dotąd oparte
na technice:
**electron
beam
physical
vapor
deposition
(EB-PVD)**



Uszczelnienia - natryskiwanie plazmowe

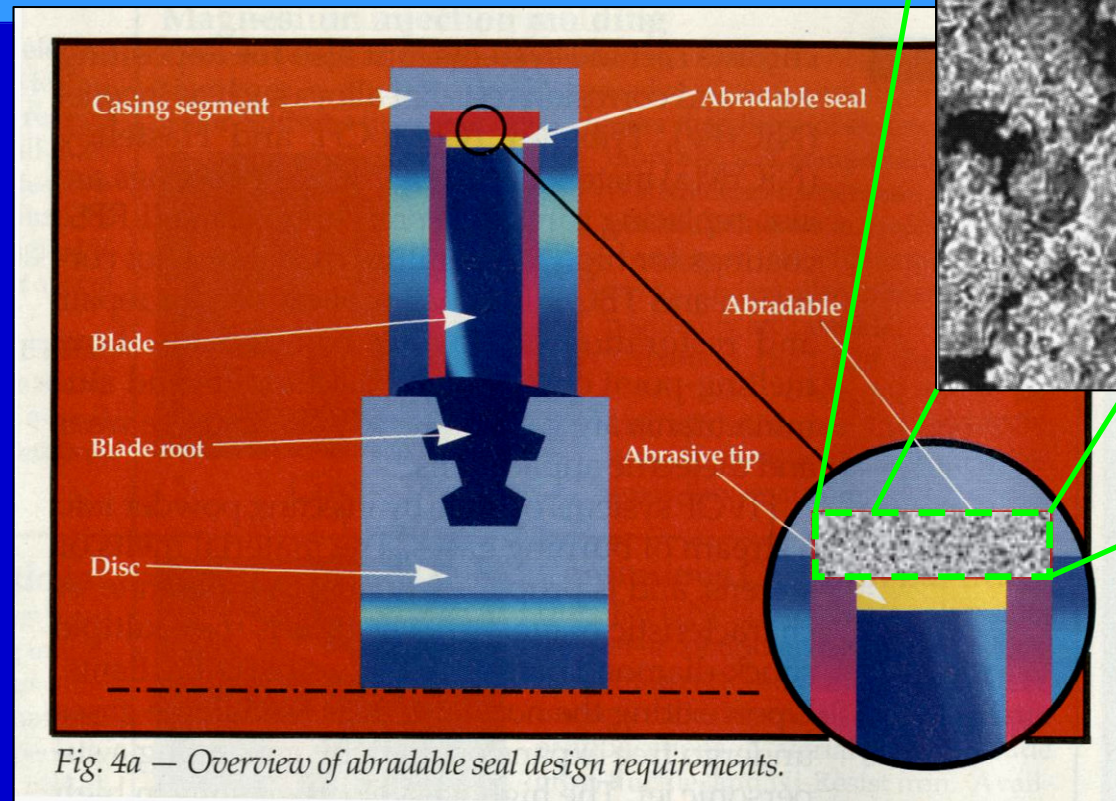


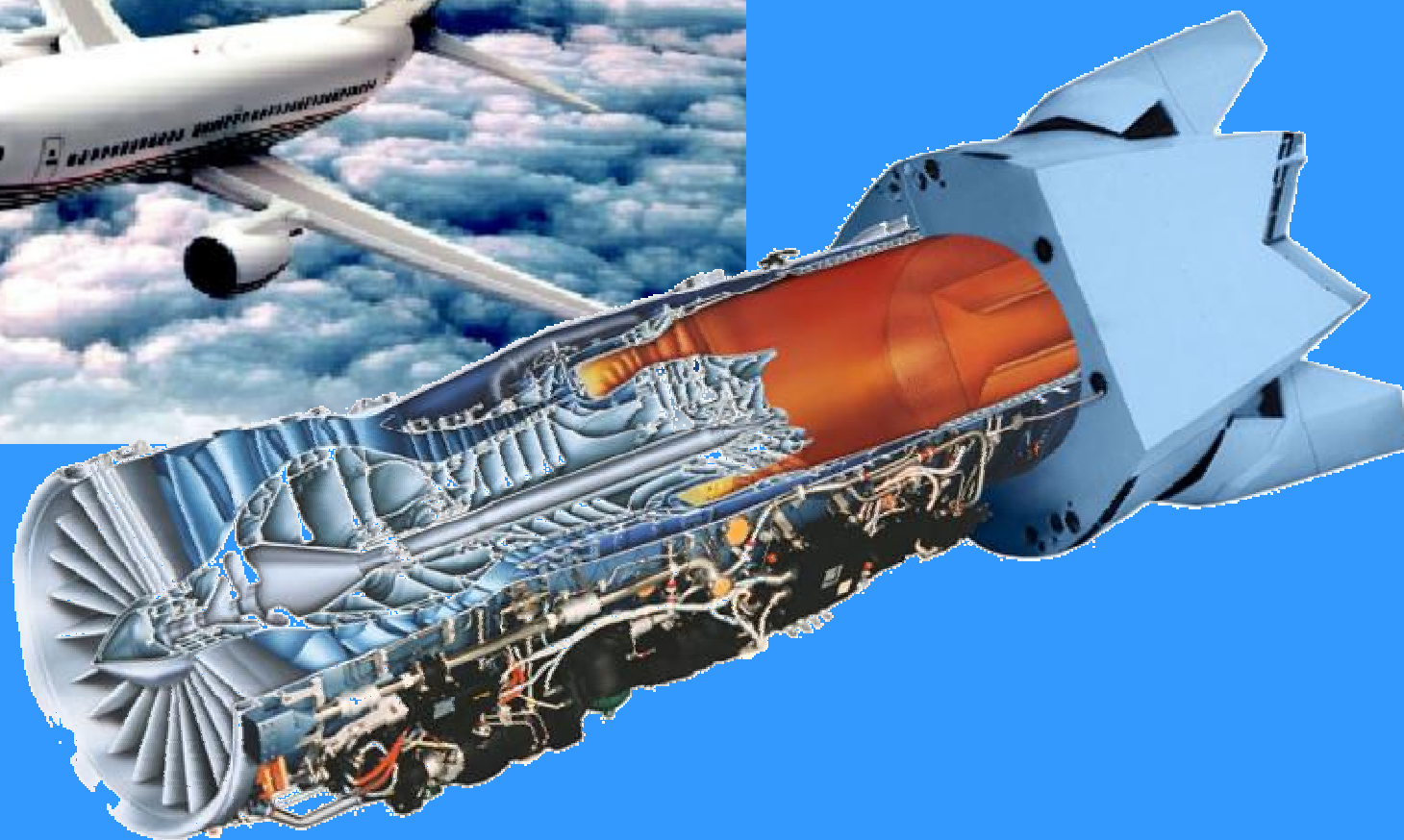
Fig. 4a — Overview of abradable seal design requirements.

Ti based

0,1 mm

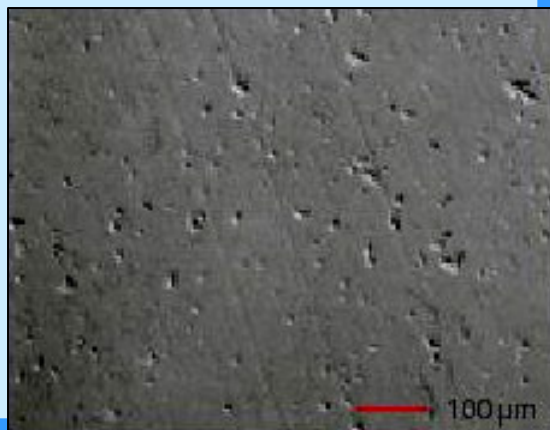
100 μm

wymagana duża
porowatość
oraz kruchość
warstwy
uszczelniającej

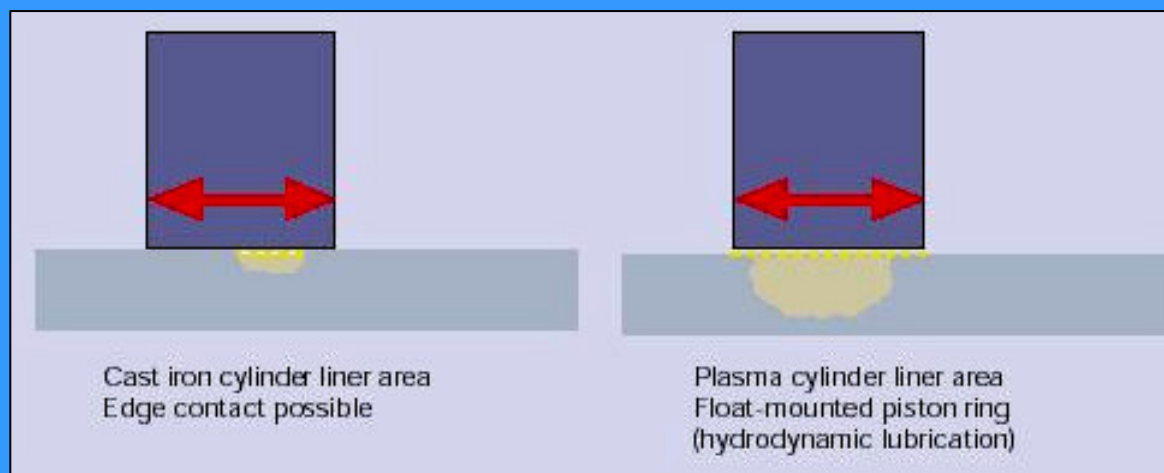


**koszt warstwy rekompensowany zwiększeniem
żywołności/ sprawności układu napędowego**

Tarcie - poślizg (sliding wear)



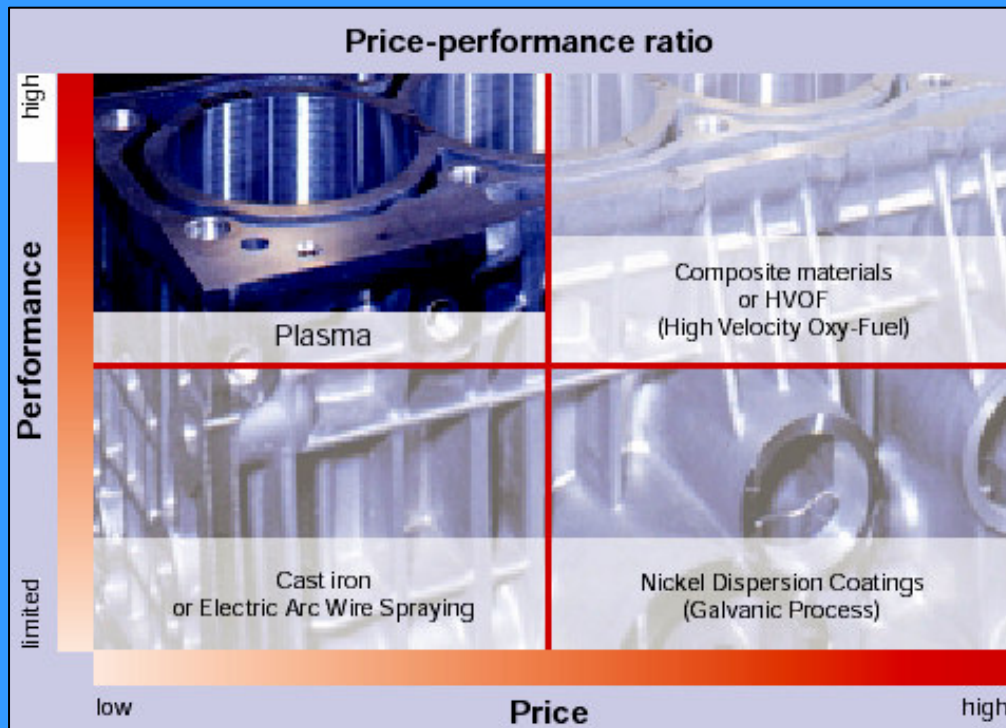
warstwa (Fe-based + Cr)
min. grub. ~ 150 μm
podłoże AlSi



Cylinder bores of an engine block processed with a plasma sprayed coating:
1) after grit-blasting, 2) after plasma spray coating, 3) after honing



Tarcie - poślizg (c.d.)



**Zalety silnika z „AlSi + natryskiwanie”
natryskiwanych /w stosunku do żeliwa/:**

- tarcie zmniejszone o ~30%
- masa obniżona o ~1kg



Podsumowanie

Proces III etapowy:

Generacja energii termicznej/
kinetycznej

- I. Interakcja energii z
materiałem nanoszonym
- II. Interakcja rozpylonych
cząstek z podłożem

Działo:
geometria dyszy
•moc
•przepływ gazów
•skład gazów

Wprowadzanie materiału:

rozmiary i kształt cząstek i drutu

- prędkość wprowadzania
- metoda wprowadzania i geometria
- gaz nośny - przepływ i prędkość
- Właściwości chemiczne i fizyczne

Strumień (płomień, plazma itd.):

- skład
- temperatura
- prędkość
- odległość
- otoczenie
- zaburzenia

Podłoże:

- zanieczyszczenie powierzchni
- temperatura
- właściwości fizyczne i chemiczne
- prędkość względem działa

20. Odparowanie łukowe

Wyładowanie łukowe – wyładowanie elektryczne o stosunkowo wysokim prądzie przy względnie niskim napięciu, charakteryzuje się kolektywnym mechanizmem emisji elektronów z katody

Wyładowanie łukowe stosuje się do modyfikacji powierzchni i syntezy cienkich warstw

- Wyładowanie łukowe
- Wyładowanie jarzeniowe częstości radiowej RF 13.56 MHz
- Wyładowanie mikrofalowe MW 2.45 GHz