



Fakulta elektrotechniky
a informatiky

FLEXIBILNÁ ELEKTRONIKA

Nanotechnológia

II. časť

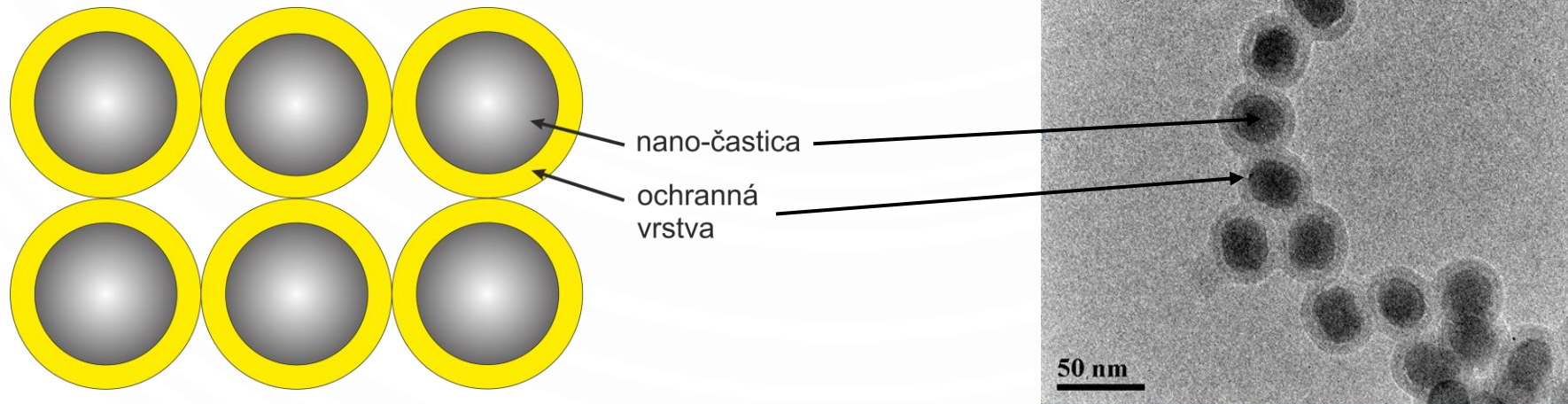
ING. PETER LUKÁCS, PHD.

peter.lukacs@tuke.sk

ÚVOD

Nanočastice:

- sú elektricky nevodivé, nakoľko každá nanočastica je obalená špeciálnou vrstvou z elektricky nevodivého materiálu.
- Organická vrstva, ktorou sú obalené nano-častice kovu, s hrúbkou niekoľkých nanometrov, bráni pohybu voľných nosičov náboja medzi nanočasticami.

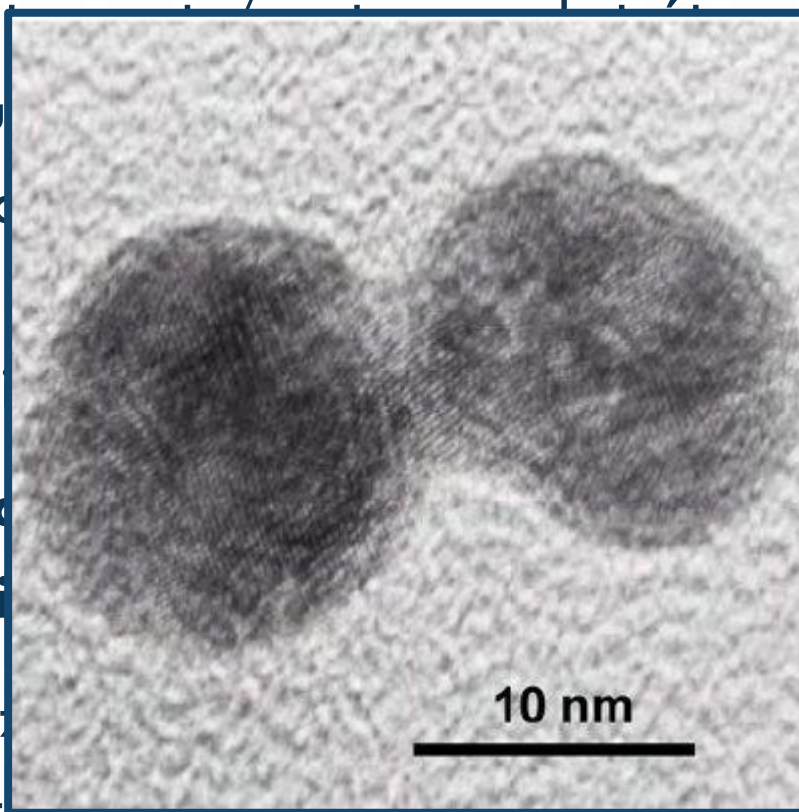


PROCES SPEKANIA

- Po zasušení nanoseného atramentu/pasty na substrát, prítomnosť stabilizačných látok a ďalších látok obsiahnutých v atramentoch/paste, bránia vytvoreniu vodivých prepojení medzi nanočasticami navzájom. Na vytvorenie vodivých prepojení nanočastíc kovov v atramente/paste je nutné nanosený atrament/pastu na substrát podrobiť procesu **spekania** (sintrovania).
- **Proces spekania spočíva vo vytvorení trvalého spojenia nano-častíc kovu pri teplotách nižších, ako je ich teplota tavenia.**
- Pri tomto procese dochádza k eliminácii nevodivých obalov z nanočastíc a vytváraniu vodivých krkov medzi časticami.

PROCES SPEKANIA

- Po zasúšení nanoseného a ďalších látok obsiahnutých v atramente/paste sa podrobí procesu **spekania** (sintrovanie) za účelom vytvorenia vodivých prepojení medzi nanočasticami kovov v atramente/paste.
- **Proces spekania spočíva v ohrevoch pri teplotách nižších, ako je potrebná pre vytvorenie nano-častíc kovu pri vysokých teplotách.**
- Pri tomto procese dochádza k zjednoteniu nano-častíc kovu z nanočastíc a vytváraniu vodivých krkov medzi časticami.



Proces spekania (sintrovanie) je kľúčovým krokom pri vytváraní vodivých prepojení medzi nanočasticami kovov v atramente/paste. Tento proces spočíva v ohrevoch pri teplotách nižších, ako je potrebná pre vytvorenie nano-častíc kovu pri vysokých teplotách. Pri tomto procese dochádza k zjednoteniu nano-častíc kovu z nanočastíc a vytváraniu vodivých krkov medzi časticami.

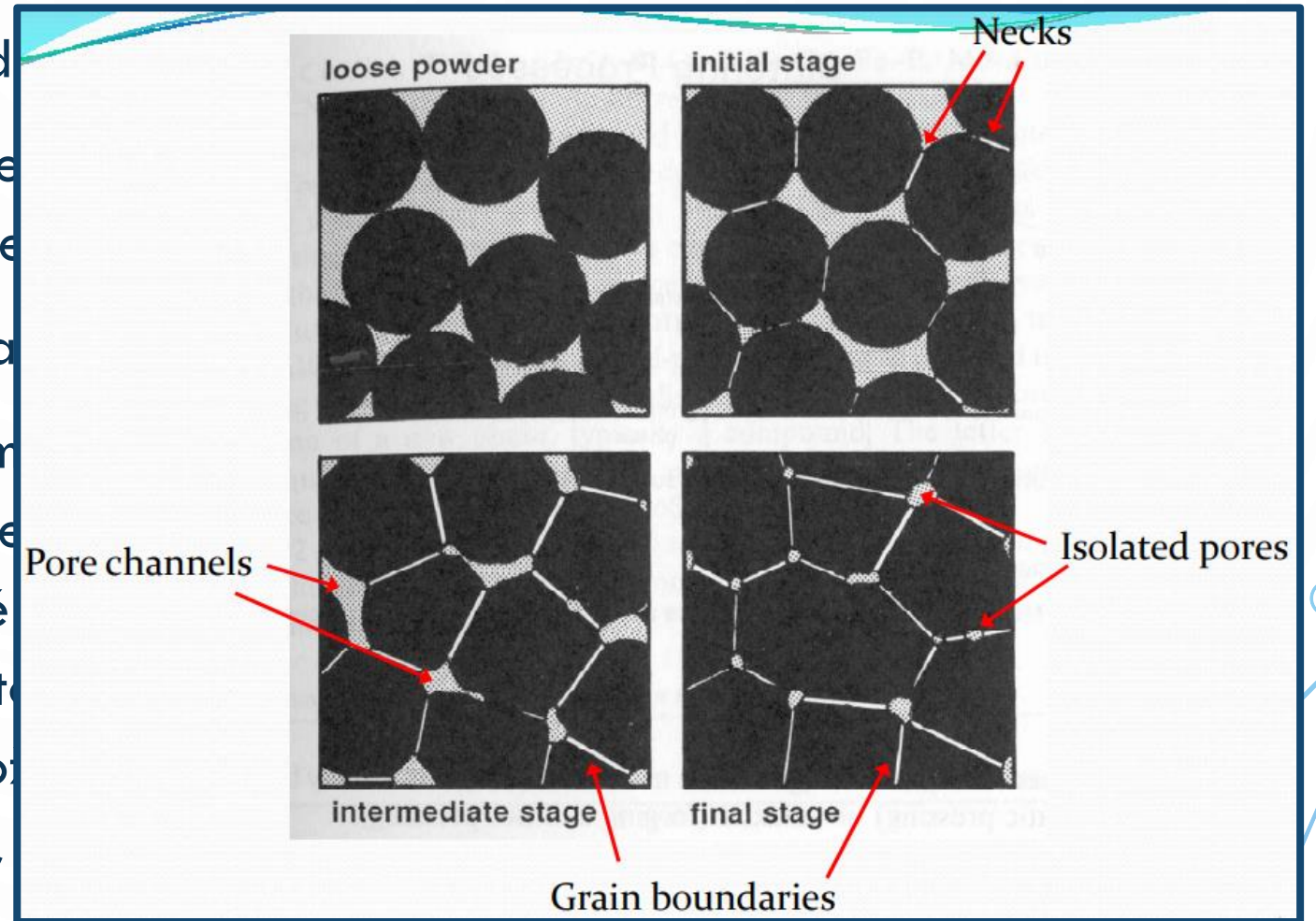
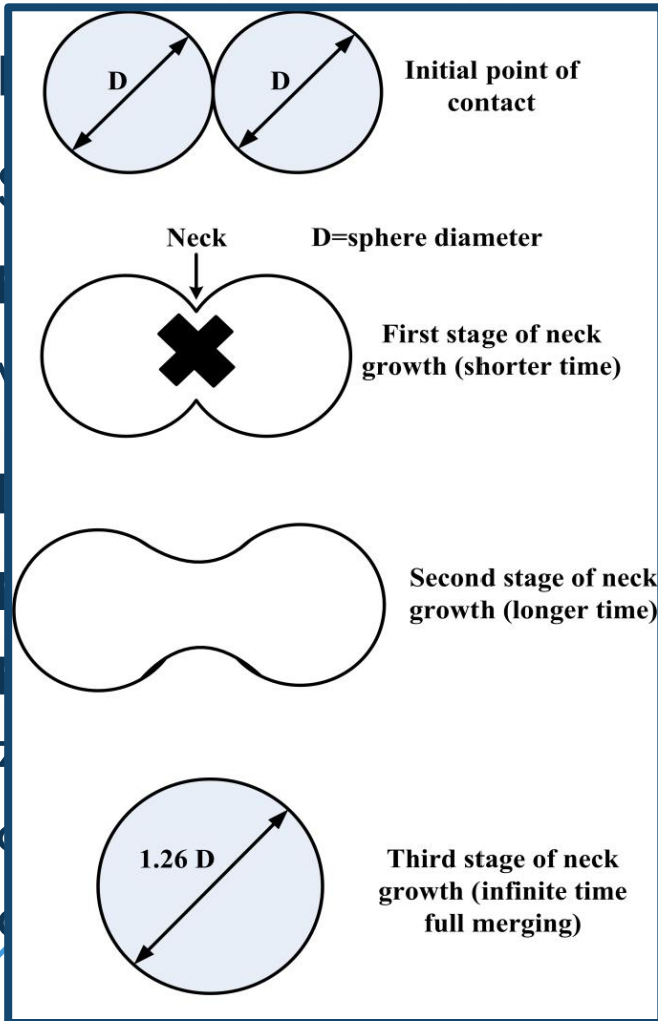
PROCES SPEKANIA

Proces spekania sa z hľadiska prebiehajúcich dejov rozdeľuje do troch štádií:

- Počiatočné štádium, kedy dochádza k vytváraniu styčných plôch (krčkov) a ich rast.
- Stredné štádium – oblasť rýchleho zmršťovania. Dosiahnutím určitej veľkosti krčkov, pôvodné častice strácajú svoju identitu a v tomto štádiu dochádza k najväčšiemu zmršteniu.
- V konečnom štádiu nastáva pomalé približovanie k teoretickej hustote.
- Dva najdôležitejšie mechanizmy spekania riadené povrchovým prenosom sú povrchová difúzia a procesy evaporácie. Povrchový aj objemový prenos materiálu podporuje rast krčkov. Povrchové transportné procesy spôsobujú rast krčkov, bez zmeny zhustenia alebo zmrštenia. Na to, aby nastalo zhustenie, hmota musí prechádzať z objemu častice s následným uložením v krčku. Objemový prenos zahŕňa objemovú difúziu, difúziu po hraniciach zŕn, plastický a viskózný tok.

PROCES SPEKANIA

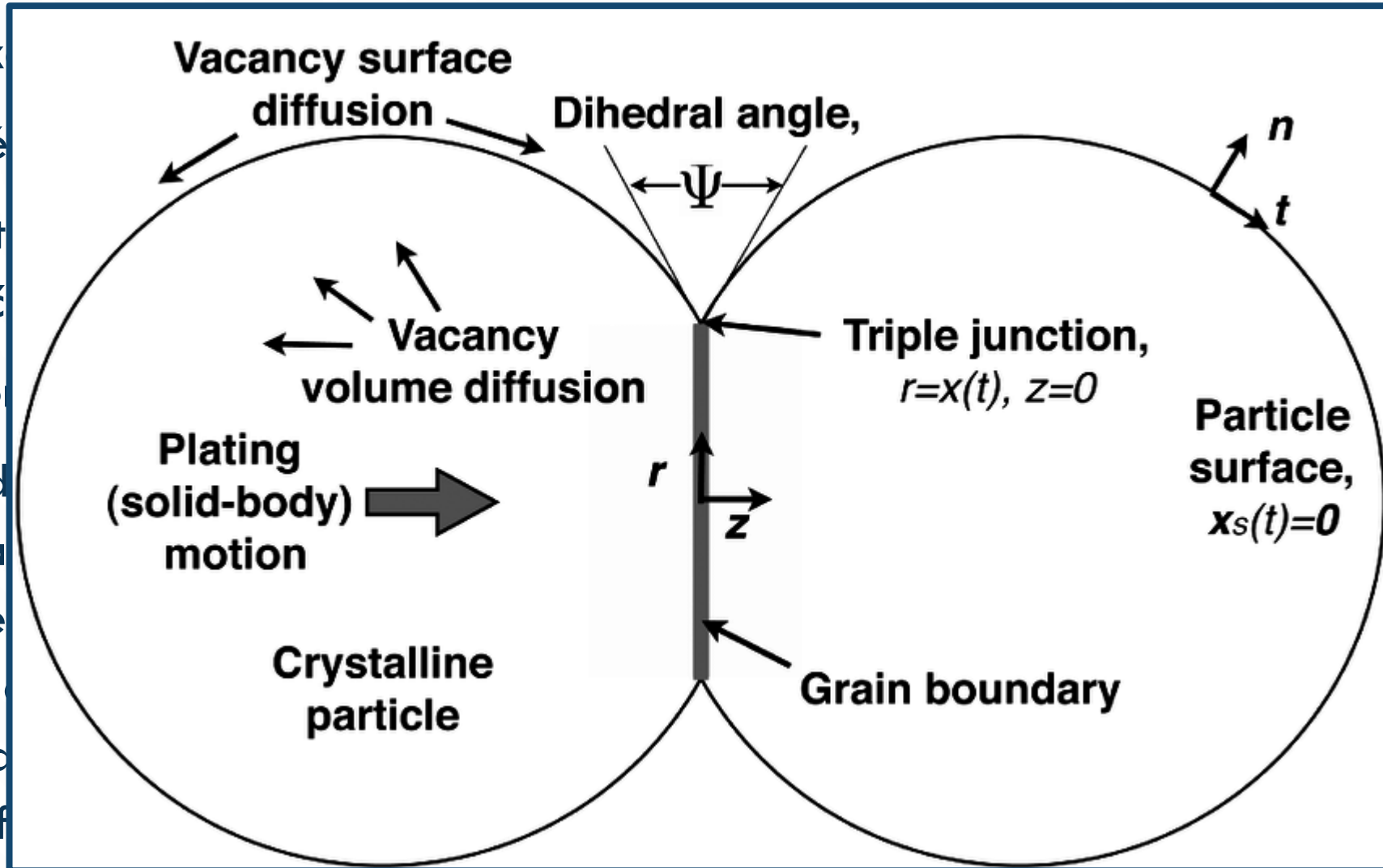
Proces spekania sa z hľadiska prebiehajúcich dejov rozdeľuje do troch štádií.



PROCES SPEKANIA

Proces spekania

- Počiatočné
- Stredné št
- pôvodné č
- V konečno
- Dva najd
- povrchová
- podporuje
- zhustenia
- objemu č
- difúziu, dif



í.

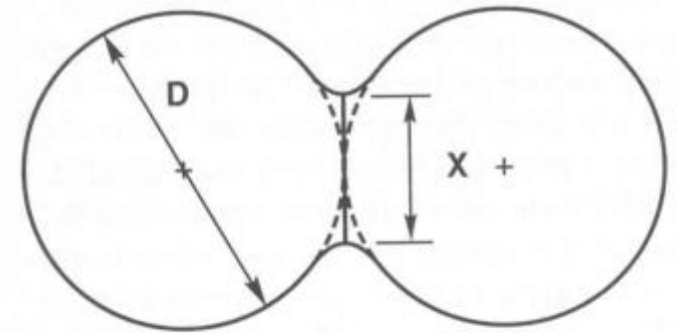
rast.
i krčkov,
eniu.
osom sú
s hmoty
ez zmeny
ádzať z
objemovú

PROCES SPEKANIA

Prenos materiálu sa uskutočňuje dvoma spôsobmi:

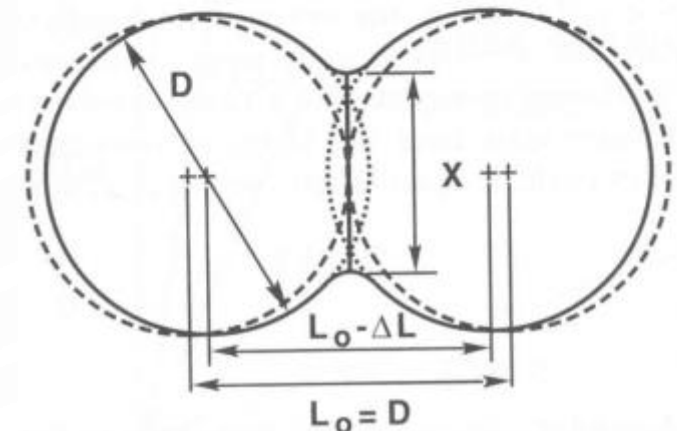
- **Povrchový prenos materiálu:**

- materiál sa presúva z povrchu do krku
- šírka krku narastá
- **nedochádza** k zmršteniu (zmene vzdialenosti medzi časticami)



- **Objemový prenos materiálu:**

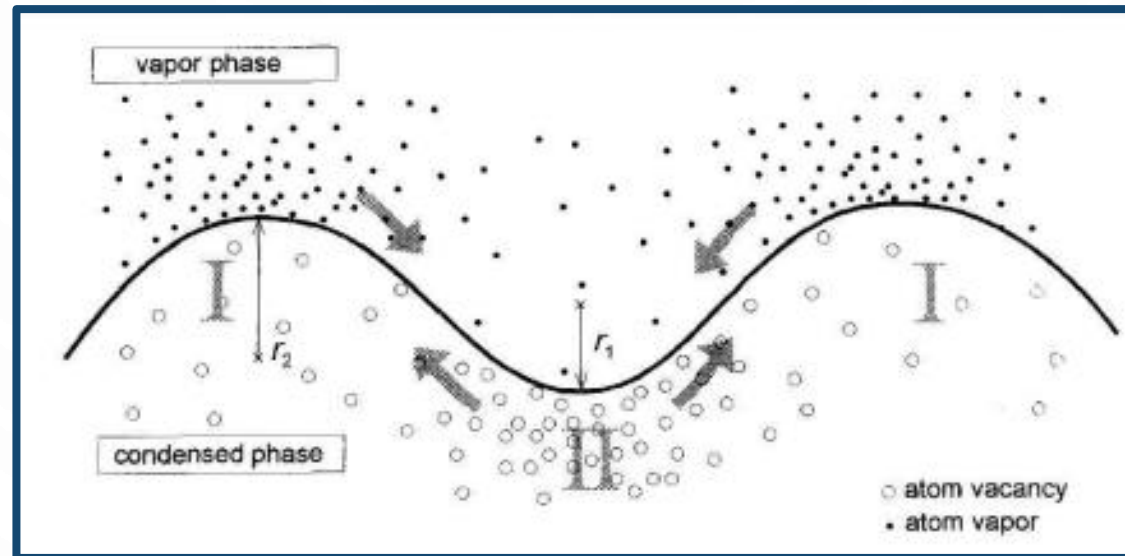
- materiál sa presúva z objemu materiálu do krku
- šírka krku narastá
- **dochádza** k zmršteniu (zmene vzdialenosti medzi časticami)



PROCES SPEKANIA

Sily potrebné pre začatie procesu spekania sú spôsobené:

- rozdielnym tlakom v objeme materiálu,
- rozdielnou koncentráciou vakancií,
- rozdielnym tlakom pár spôsobeným rozdielmi v tvare povrchu častíc.



PROCES SPEKANIA

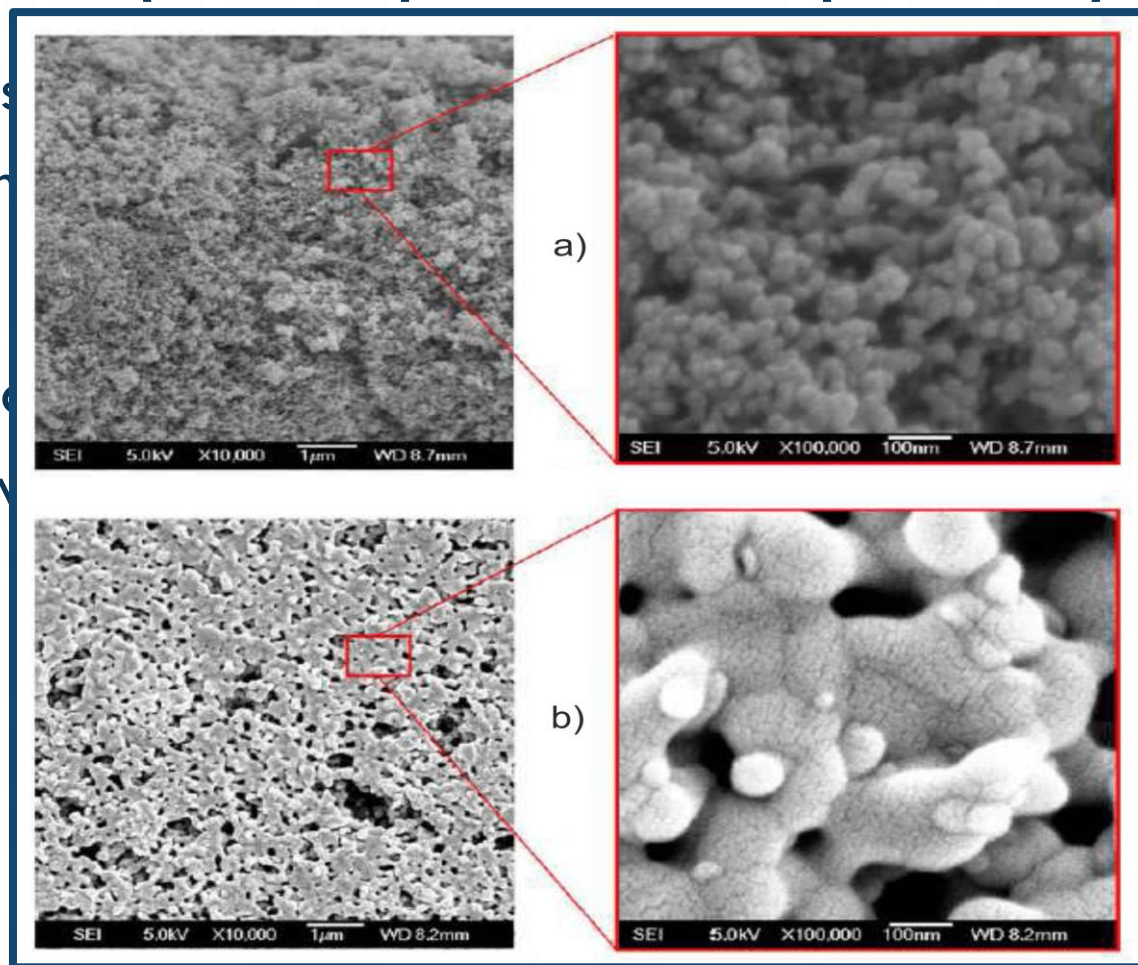
Pre spekanie nanočastíc je nutné splniť 2 dôležité podmienky:

- prvá podmienka súvisí s elimináciou ochrannej vrstvy v okolí nano-častíc s cieľom potlačenia vysokého odporu natlačeného motívu pri čo najnižšej možnej teplote,
- druhá podmienka spočíva vo vytvorení krkov pri čo najnižšej teplote, pri ktorej sa vytvorí vodivý materiál spečením nanočastíc (štruktúra sa stáva vodivou). Táto podmienka je ovplyvnená najmä organickými zložkami nachádzajúcimi sa v atramente, spôsob spekania a druhom a veľkosťou nanočastíc.

PROCES SPEKANIA

Pre spekanie nanočastíc je nutné splniť 2 dôležité podmienky:

- prvá podmienka s potlačenia vysokéh
- druhá podmienka vytvorí vodivý m
- podmienka je ov
- atramente, spôsob



nano-častíc s cieľom
možnej teplote,
teplote, pri ktorej sa
stáva vodivou). Táto
nachádzajúcimi sa v

- a) pred procesom spekania
- b) po procese spekania

SPÔSOBY SPEKANIA

- Najčastejšie používaná metóda spekania nanočastíc kovu je tepelná metóda. Z dôvodu vysokého pomeru plochy k objemu nanočastíc kovu sú nanočastice charakteristické zníženou teplotou tavenia.
- Napríklad v prípade nanočastíc striebra alebo zlata s priemerom 2,5 nm, je ich bod tavenia pri teplote okolo 400 a 500 °C. V prípade nano-častíc zlata s priemerom 1,5 nm bolo experimentálne zistené, že teplota tavenia je nižšia ako 380 °C, pričom teplota tavenia zlata vo všeobecnosti je 1063 °C.
- Teplota tavenia je nižšia aj v prípade nanočastíc s priemerom 20 nm, než je všeobecná teplota tavenia materiálu (materiálová konštanta).
- Zvýšená vlastná difúzia atómov indukuje počiatočnú tvorbu krkov medzi nano-časticami kovu, čo spôsobuje spájanie nano-častíc. Vplyvom difúzie dochádza tiež k rastu zrn a celkovému zmršteniu štruktúry

SPÔSOBY SPEKANIA

Spekanie nanočastíc sa realizuje nasledovnými metódami:

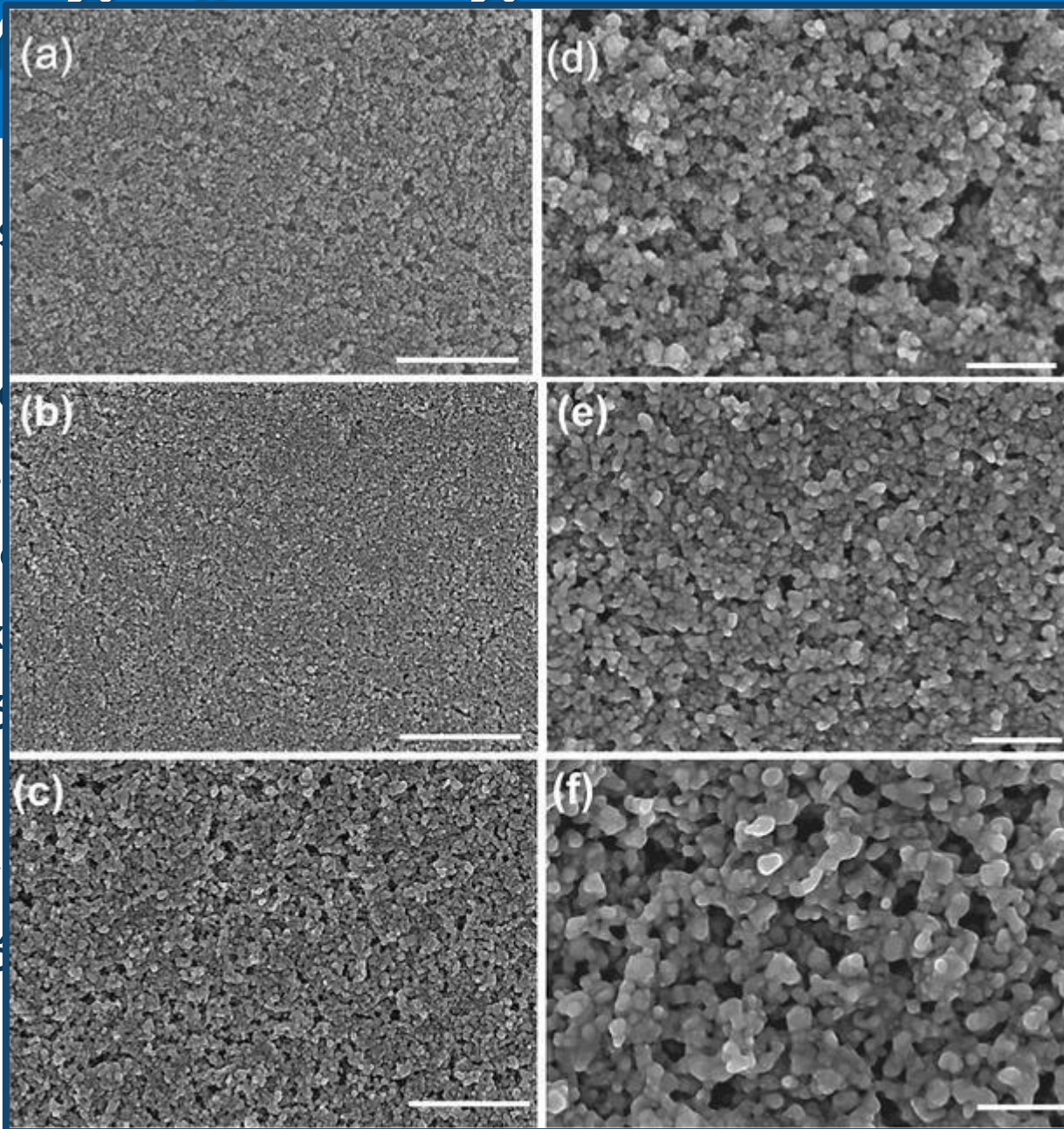
- teplom,
- mikrovlnným žiarením,
- laserom,
- UV svetlom,
- plazmou,
- elektrickým prúdom,
- chemickou reakciou.

TEPELNÝ SPÔSOB SPEKANIA

Vystavenie nanočastíc pôsobeniu teplotného spekania má za následok odparenie kvapalných látok zo štruktúry (dispergent), ako aj vytvorenie trvalého spojenia nanočastíc kovu. Hlavným problémom pre dosiahnutie požadovanej hodnoty vodivosti natlačenej vrstvy spočíva v prítomnosti izolačných vrstiev zložených z organických stabilizátorov, ktoré obklopujú nanočastice kovu. Pre úplné odparenie všetkých organických zložiek z atramentu/pasty je zvyčajne potrebné vrstvu podrobiť teplote 250°C a viac, pričom len veľmi zriedka dochádza k vytvoreniu vodivého spoja pri teplote nižšej, než 150°C. Pri tomto postupe je potrebné v závislosti od použitých atramentov/pást zvážiť aj dĺžku spekania, ktorá sa môže pohybovať v rozmedzí od 10 až po 90 minút, pričom je potrebné zvážiť aj samotnú kvalitu použitého substrátu.

TEPELNÝ

Vystavenie nanočias kvapalných látok nanočastic kovu. Hlavná vrstva s nanotlačenej vrstvy s stabilizátorov, ktoré organických zložiek 250°C a viac, pričom teplotu nižšiu, než atramentov/pást zväčša až po 90 minút, pričom

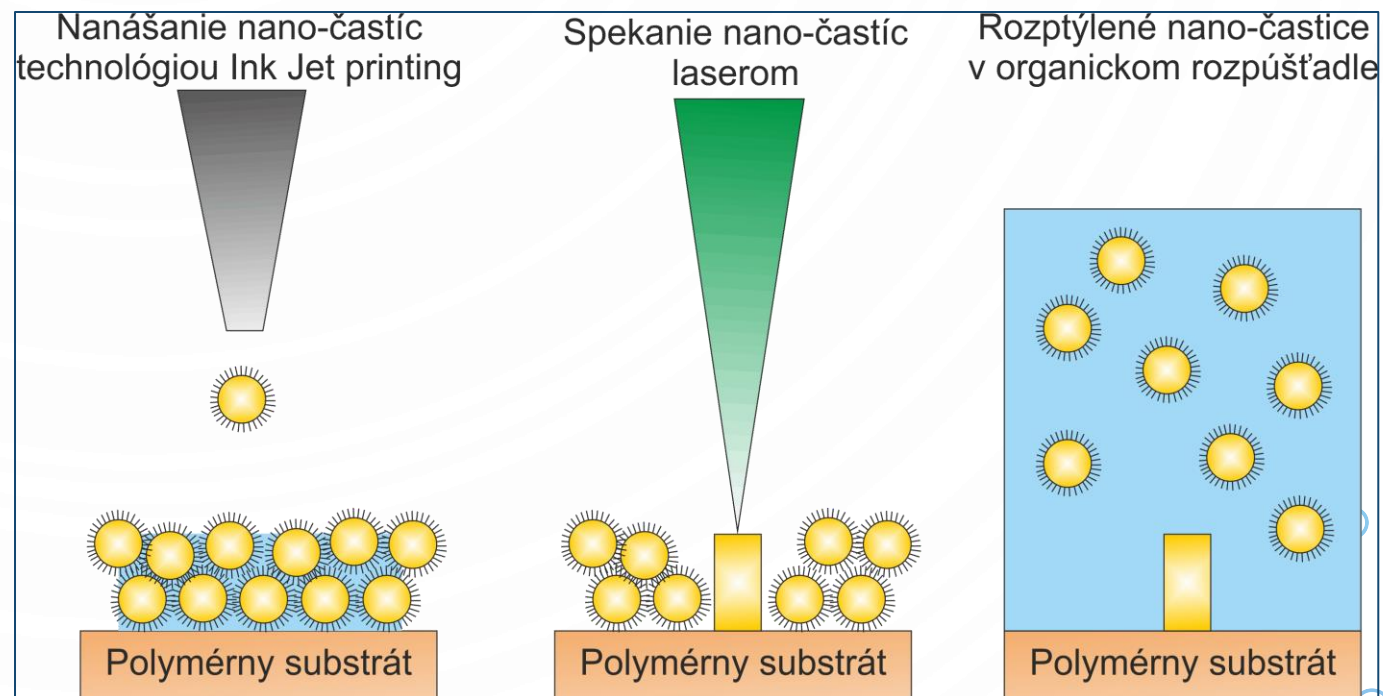


ako dôsledok odparenia trvalého spojenia s vyššou hodnotou vodivosti. Nanočastice z organických zložiek po odparenie všetkých zložiek môžu byť podrobené teplote vodivého spoja pri teplotnosti od použitých atramentov v rozmedzí od 10°C do 250°C na substrátu.

SPEKANIE LASEROM

Mechanizmus spekania laserom nano-častíc kovov je veľmi podobný mechanizmu spekania teplom. Absorpcia laserovej energie natlačenou vodivou vrstvou má za následok odparenie dispergentu a iných organických zložiek a trvalé spájanie nanočastíc kovu pomocou krkov.

Hlavnou výhodou lokálneho ohreву laserom je redukcia zón postihnutých vysokou teplotou, vyššia efektivita, selektívny prenos energie, čo je veľmi dôležité pre oblasť elektroniky citlivej na zvýšenú teplotu. Zvyšné nanočastice, ktoré neboli podrobené procesu spekania laserom, je možné pomocou organického rozpúšťadla odstrániť zo substrátu.



MIKROVLNNÉ SPEKANIE

Nano-častice kovu je možné spekať pomocou aplikovania mikrovlnného žiarenia, avšak hĺbka preniknutia žiarenia je veľmi malá. Hĺbka preniknutia žiarenia v prípade frekvencie 2,54 GHz pre nanočastice striebra, zlata a medi je v rozsahu 1,3 až 1,6 μm . Mikrovlnné spekanie je úspešné len v prípade, ak sú rozmery objektu kolmo na rovinu dopadu žiarenia na rovnakej úrovni, ako hĺbka prieniku radiácie. Hĺbku prieniku žiarenia h je možné určiť nasledovne:

$$h = \frac{c\varepsilon_0}{2\pi f \varepsilon''} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma_v}}$$

kde c je rýchlosť svetla,

σ_v je vodivosť,

f je frekvencia mikrovlnného žiarenia,

ε_0 je permitivita vákua.

Ďakujem za pozornosť.



**Faculty of Electrical Engineering
and Informatics**

Peter Lukacs, Ph.D.

Department of Technologies in Electronics
Faculty of Electrical Engineering and Informatics
Technical University of Košice
Košice, Slovakia
peter.lukacs@tuke.sk