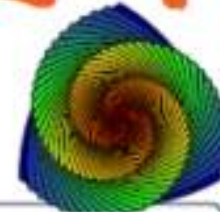




16. OLOMOUCKÝ FYZIKÁLNÍ KALEIDOSKOP

Kdy: pátek 25. ledna 2019 od 9:00 do 13:00

Kde: Přírodovědecká fakulta UP, 17. listopadu 12, Olomouc



Technologické aplikace laserů

RNDr. Hana Chmelíčková

Společná laboratoř optiky UP a FZÚ AV ČR

17. listopadu 50a, 772 09 Olomouc

Co je to LASER ?

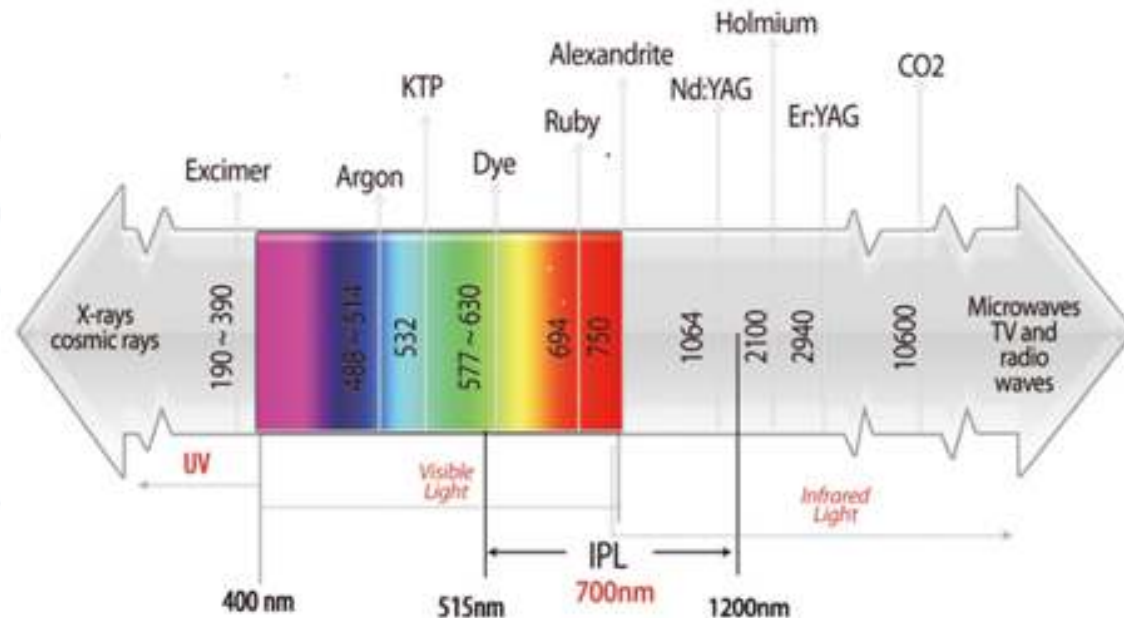
- Light **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation (teoretická predikce 1916 A. Einstein, první konstrukce rubínového laseru 1960 T. Maiman)
- **Zdroje** koherentního monochromatického elektromagnetického **záření** z optické oblasti spektra (frekvence od $3 \cdot 10^{11}$ Hz do $1,7 \cdot 10^{15}$ Hz odpovídající vlnovým délkám od **180 nm do 1 mm**)
- Názvy jednotlivých typů laserů jsou většinou odvozeny od chemického složení zářiče (aktivního média):
 - Excimer** = excitované dvojmolekuly vzácných plynů nebo jejich sloučeniny s fluorem (ArF), chlórem (XeCl), září výhradně v UV spektru
 - Rubínový laser** = tyčinkový krystal rubínu – safír, dopovaný ionty chrómu ($\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Cr}^{3+}$), 694 nm
 - Nd:YAG** = Yttrium Aluminum Garnet krystal dopovaný ionty neodymu, infračervená 1 064 nm

CO₂ = molekuly kysličníku uhličitého ve směsi pomocných plynů dusíku a helia, daleké infra 10 600 nm

Dye lasery (barvivové) = roztoky organických barviv ve vodě, alkoholech

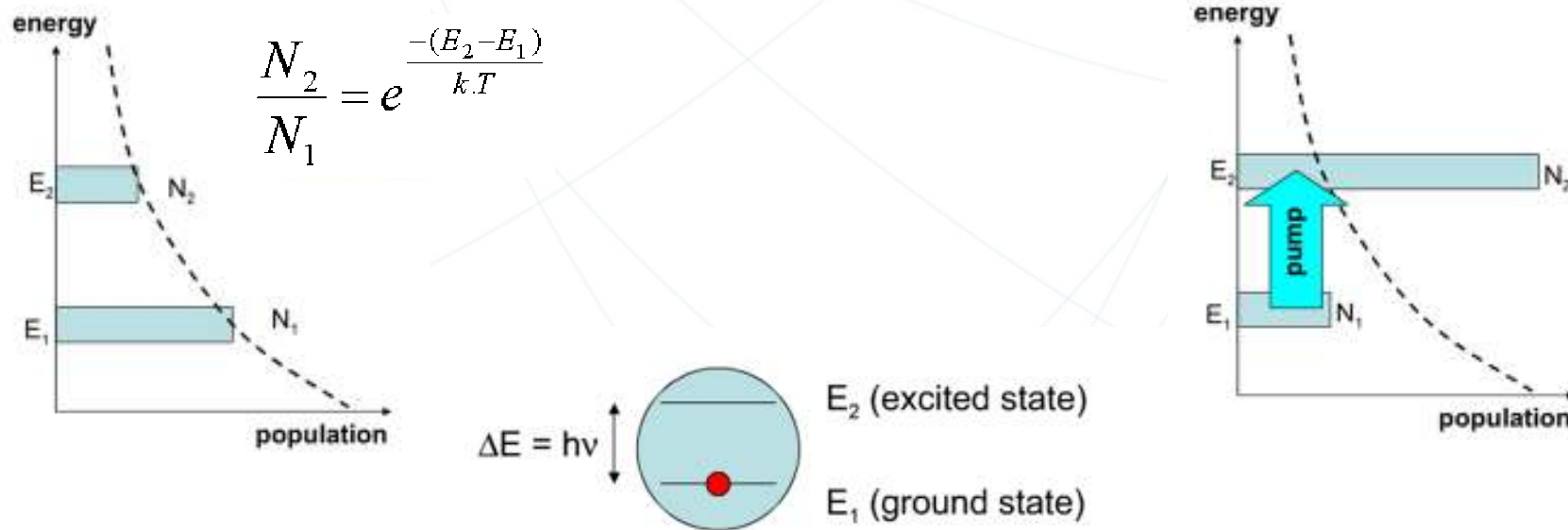
Fiber laser – vláknové lasery = skleněné optické vlákno dopované ionty yterbia, erbia, thulia, ...

Laserové diody /diodové lasery = páry elektro – díra ve vybraných typech polovodičů

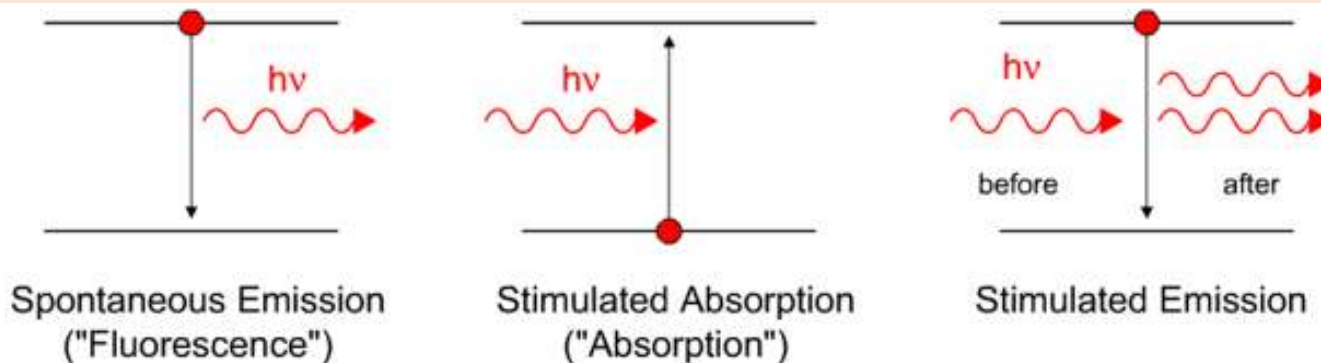


LASER – fyzikální princip

- Princip činnosti: Stimulovaná emise záření v soustavě N/m^{-3} identických částic, podmínka záření - inverzní populace energetických hladin $N_2(E_2) > N_1(E_2)$, udržovanou vnějším zdrojem energie

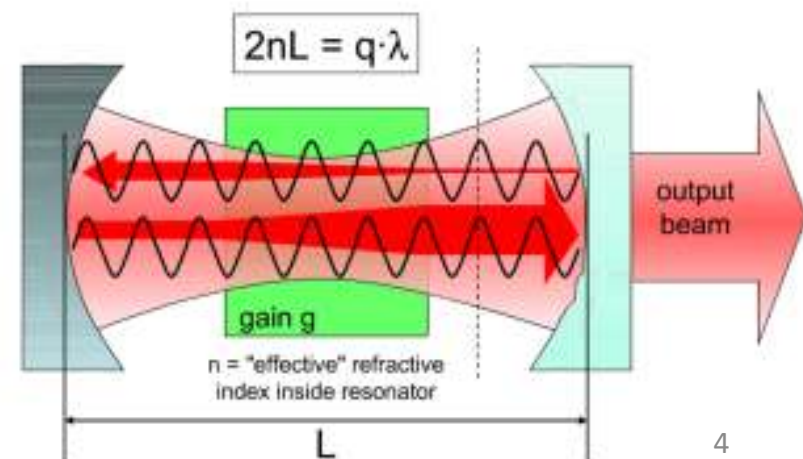
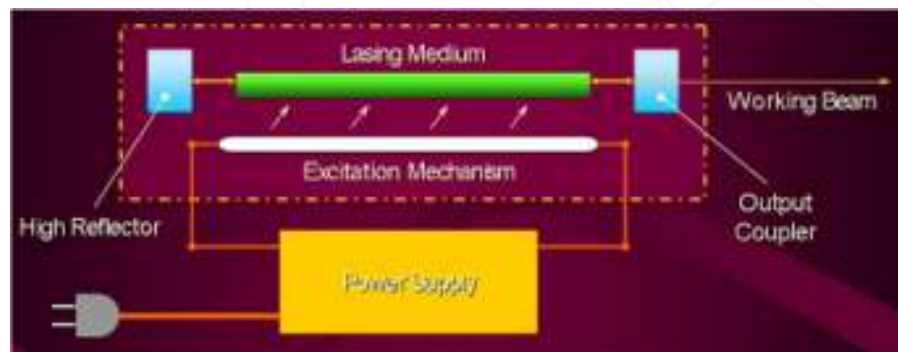


$\Delta E = h\nu$... energetické kvantum – foton, $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ J/s...Planckova konstanta, ν (Hz)... frekvence, $\lambda = c/\nu$...vlnová délka záření



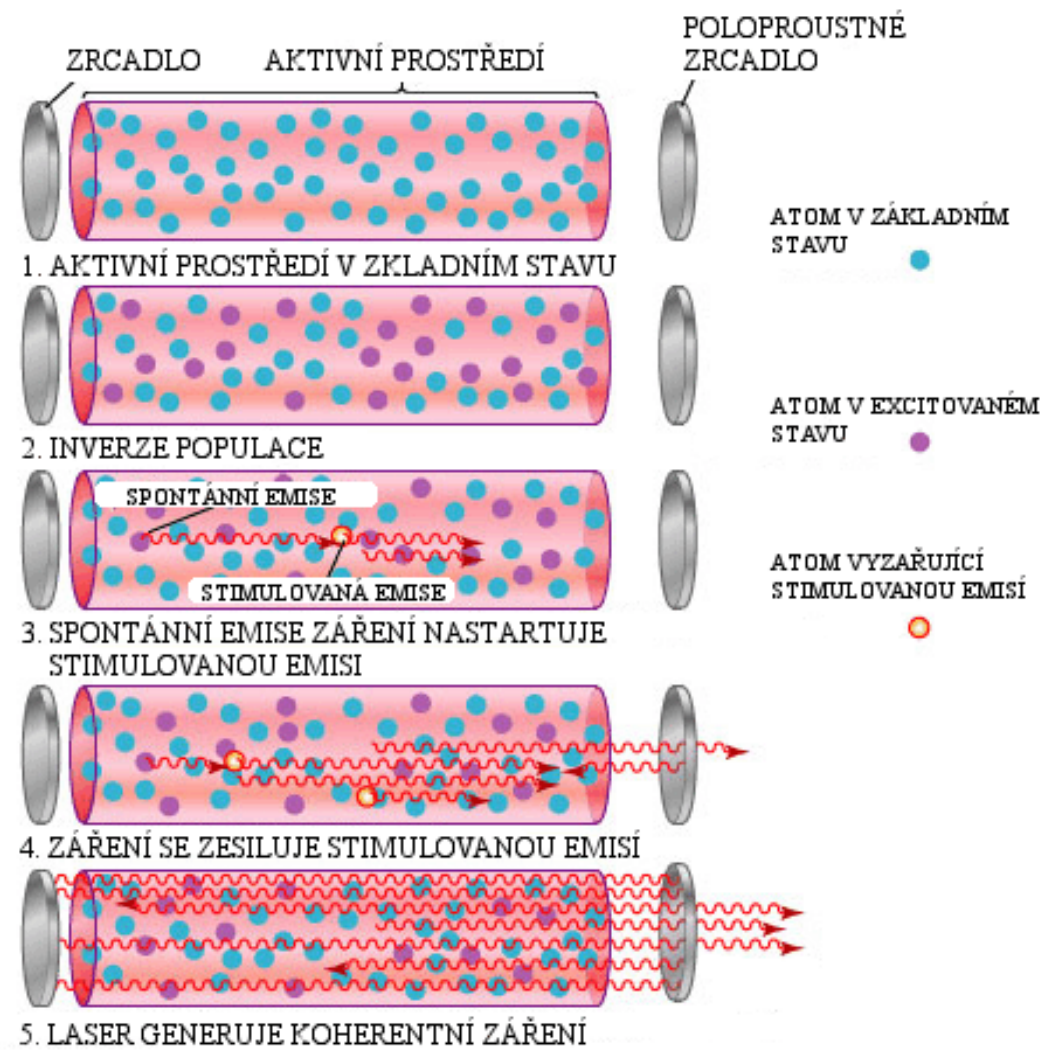
LASER – konstrukce

- **Aktivní prostředí:** aktivní částice (zářiče) - atomy, ionty nebo molekuly zabudované do vhodného nosiče (směs plynů v uzavřené trubici, roztok organických barviv v kyvetě, syntetický krystal, sklo nebo skleněné vlákno), u polovodičových laserů elektrony a díry v P/N přechodu (od roku 1960 neustálý výzkum)
- **Čerpání (dle skupenství AP):** elektrický výboj, vysokofrekvenční proudy, RTG záření, záření Kr výbojky, laserových diod nebo jiného laseru
- **Optický rezonátor:** 2 odrazné plochy s dielektrickými vrstvami pro odraz vybrané vlnové délky (filtrace), délka L musí být rovna $n \cdot \lambda / 2$ pro vznik stojatého vlnění, zesiluje záření několikanásobnými průchody aktivním prostředím, usměrňuje záření podél optické osy, výstup „polopropustným“ zrcadlem nebo otvorem ve 100 % odrazném zrcadle, čerpání (**gain**) musí být v rovnováze s vnitřními a vnějšími ztrátami rezonátoru, typ chlazení podle výkonu (pasivní, kondukcí, ventilátorem, vodou)



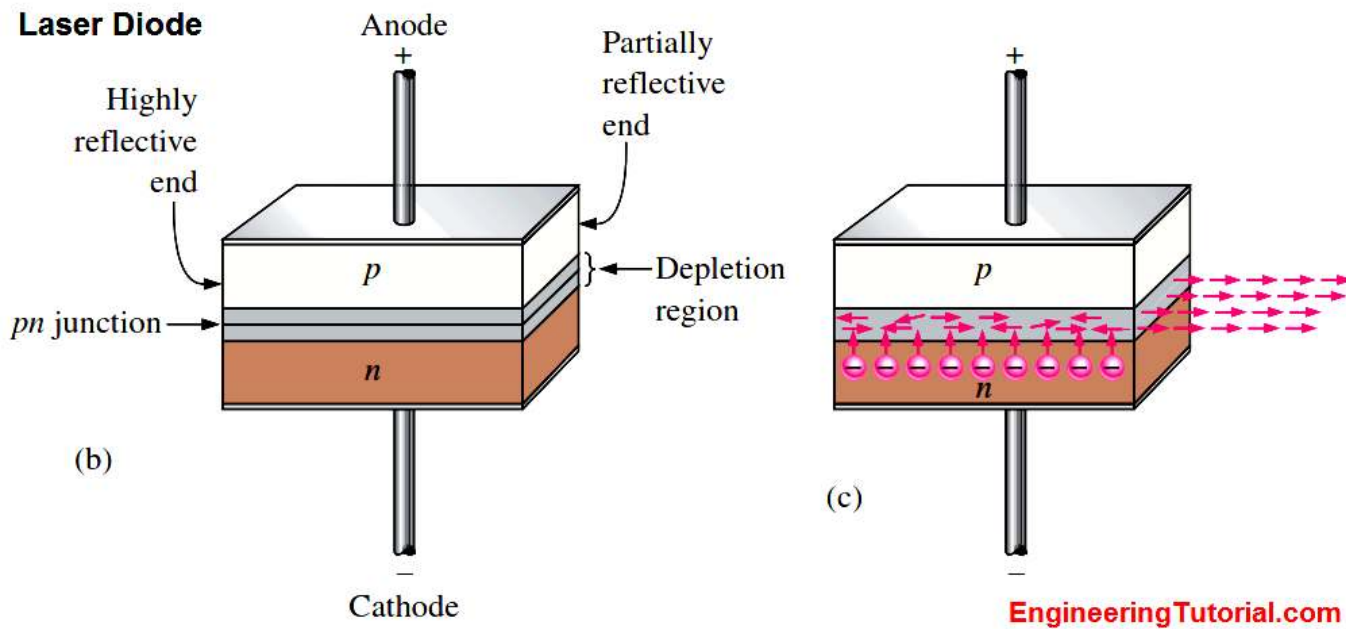
LASER – činnost

- Model laseru s tyčinkovým krystalem (https://www.aldebaran.cz/bulletin/2009_45_las.php)
- Další modely a animace na YOU TUBE pod heslem **laser principle** nebo **how laser works**



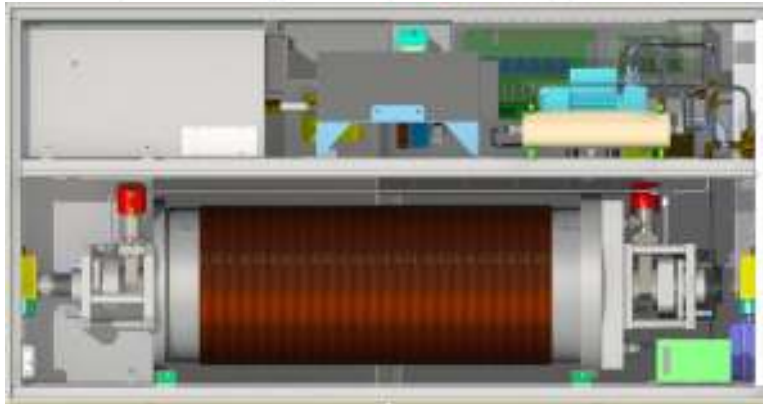
LASER – činnost

- Model laserové diody (<https://engineeringtutorial.com/laser-diode-working-principle/>)



Lasery pro technologické aplikace

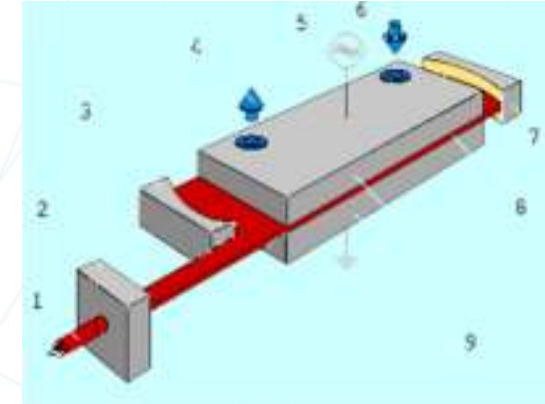
Excimery (XeCl)
UV (150 nm – 380 nm)



CO₂ TruFlow
FIR (10,6 μm)



CO₂ slab laser



Vláknový laser

Yb (1 030 nm),
Th (2 μm) Er (3 μm)

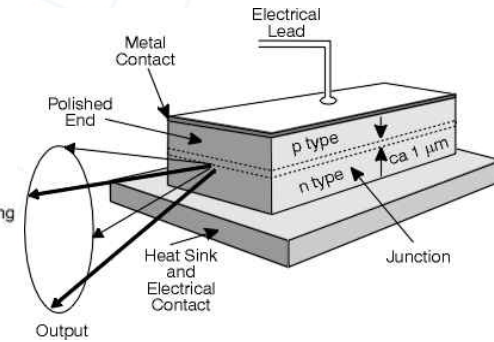
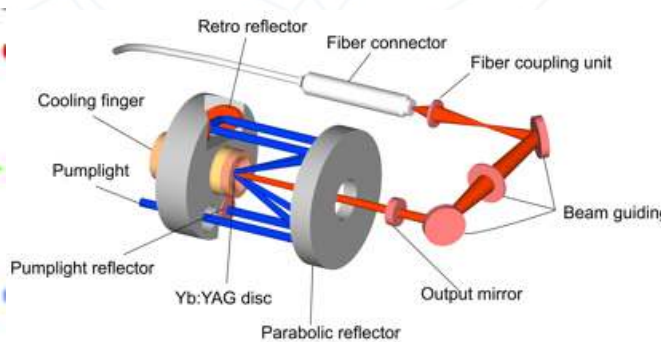
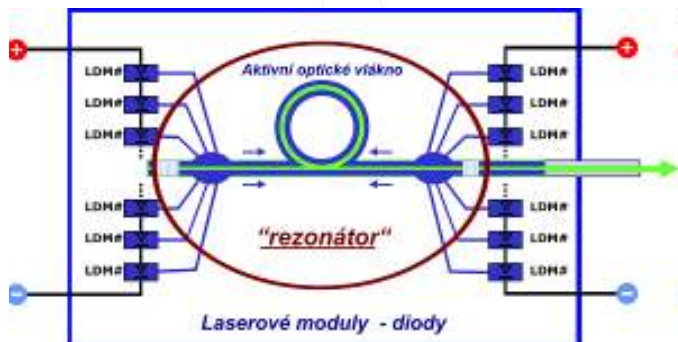
Pevnolátkový laser

Nd:YAG (1 064 nm), Nd:YVO₄,
Yb:YAG, Yb:KGW

Polovodičový laser

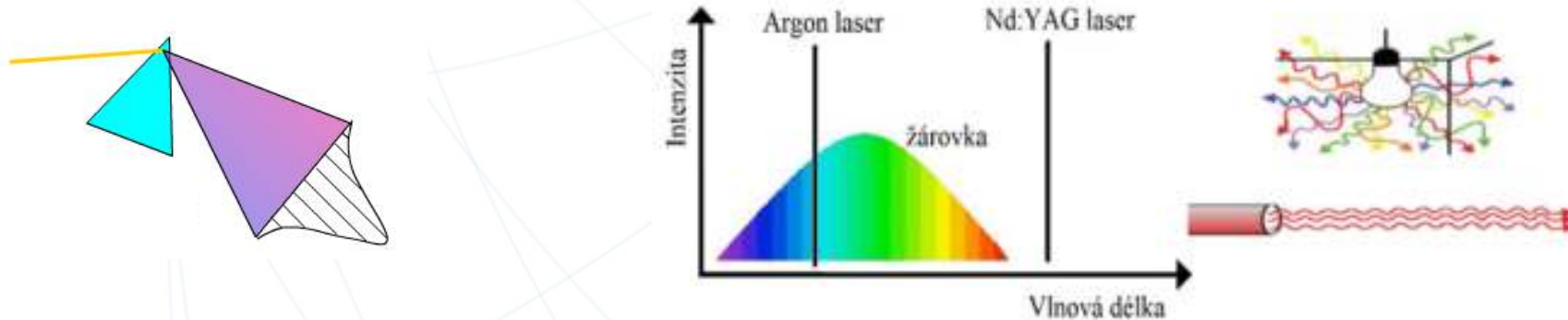
~ 980 nm

Možnost generace polovičních, třetinových i čtvrtinových λ (SHG 515 nm, THG 343 nm, FHG 257 nm)



LASER – vlastnosti výstupního záření

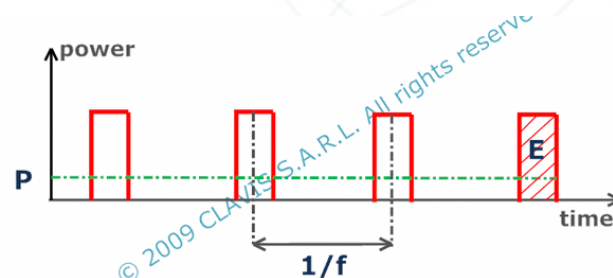
- Monochromatické resp. úzká spektrální čára (+/- 0,1 nm)



- Časově a prostorově koherentní – stejný směr, fáze a amplituda

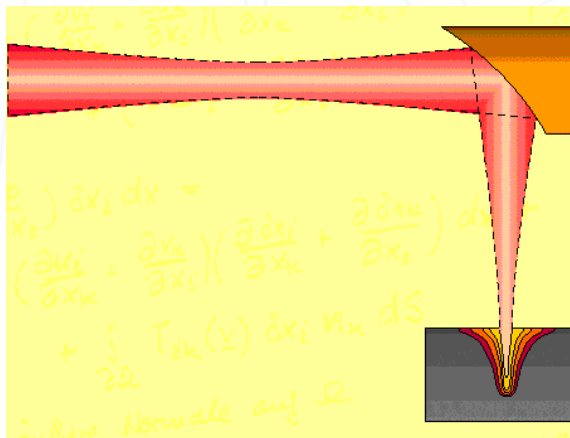


- Nízká rozbíhavost svazku – divergence ($0,5 - 10 \text{ mrad} = 0,02^\circ - 0,57^\circ$) ($D_0 = 2 \text{ mm}$, $D_z = 3 \text{ mm}$)
- **REŽIM GENERACE:** kontinuální (CW) nebo pulsní (vývoj různých metod generace pulsů v rezonátoru pomocí aktivních či pasivních optických prvků - délky **ms**, **ns**, **ps** nebo **fs**, energie **E** je dávkována ve frekvenci **f** do limitu průměrného výkonu $P = E \times f$, určující je výkon v pulsu $P_{\text{peak}} = E/t$)

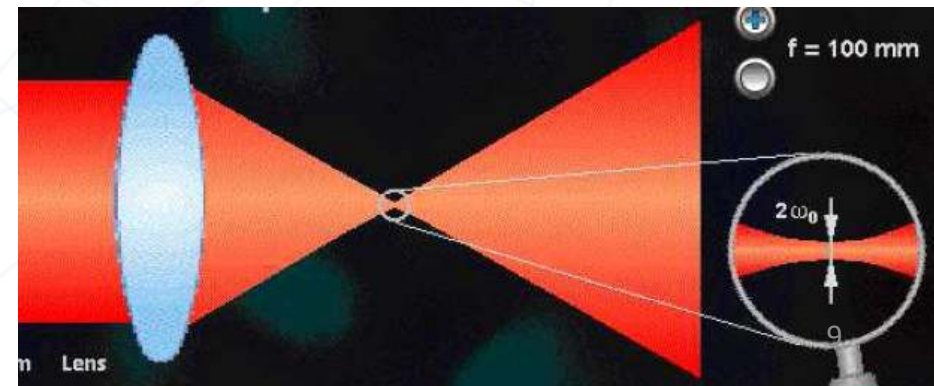
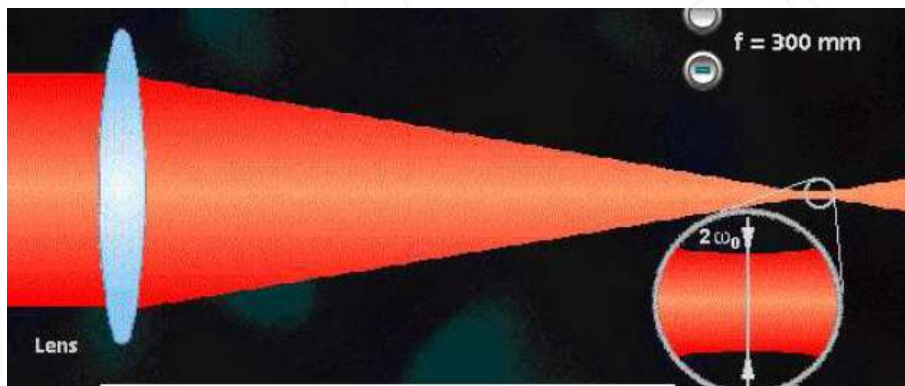
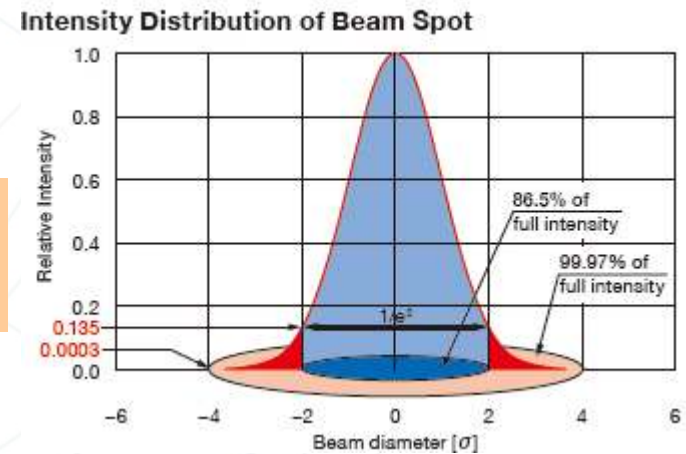


Fokusace laserového svazku

- Soustředění energie záření do stopy o průměru 1 μm až 1 mm pro dosažení potřebné hustoty výkonu pro požadovanou aplikaci ($10^3 - 10^8$) W.cm⁻²
- Průměr svazku definován jako $2w_0$, kde $I(w) = I_{\max} \cdot e^{-2} (0,135 \cdot I_0)$
- Odrazem na zrcadlech nebo průchodem přes optické čočky do výkonu 5 kW, průměr svazku v ohnisku závisí na ohniskové vzdálenosti čočky F a na průměru D_0 a rozbíhavosti svazku dopadajícího na čočku – vyjadřuje parametr BPP

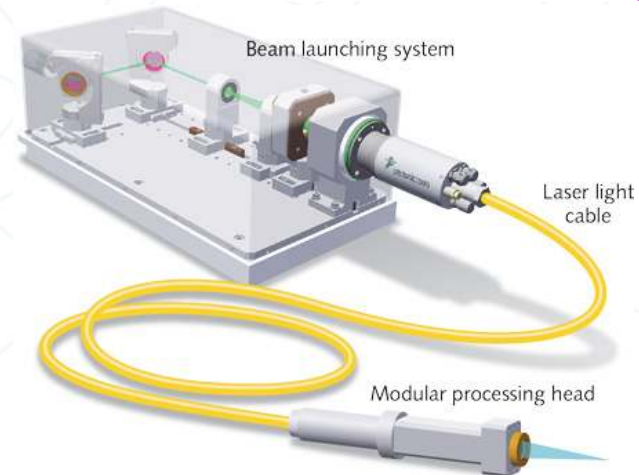
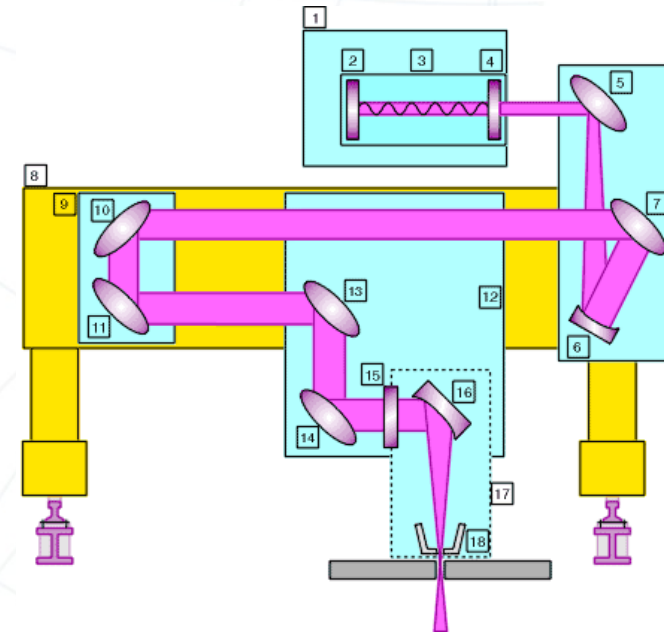


$$D_{foc} = \frac{4\lambda F}{\pi D_0 K} = 4BPP \frac{F}{D_0}$$



LASER - realizace technologického nástroje

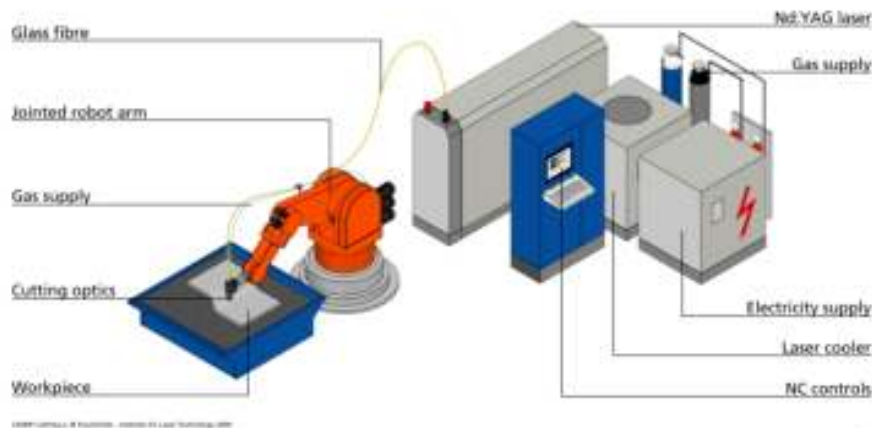
- Fokusační optika je umístěna v pracovní hlavě s dalšími prvky pro sledování procesu, odměřování vzdálenosti, vedení pracovního plynu
- Spojení výstupu z laseru se vstupem do pracovní hlavy: těsné, vzdálené přes soustavu pohyblivých zrcadel, přenosem přes optické vlákno
- Vzájemný pohyb ohnisko x obrobek – létající x pevná optika



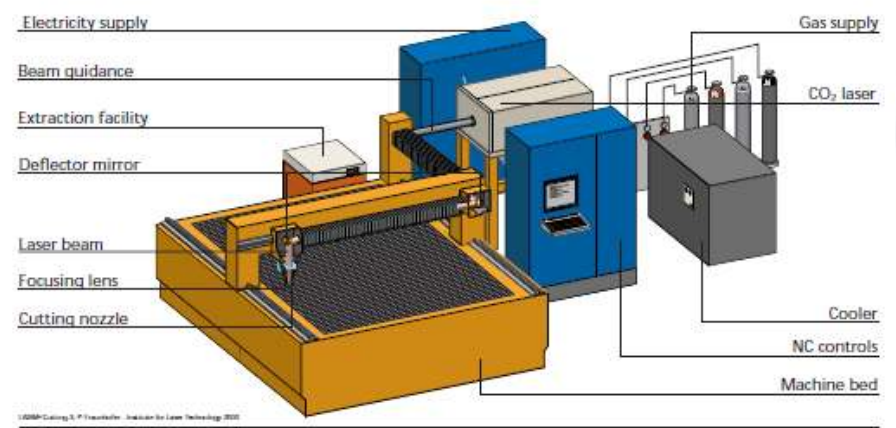
LASER - realizace komplexního systému

- Základní sestava: laser + pracovní hlava, polohovací systém XYZ (U,W) + CNC řízení, fixace obrobku
- Bezpečnostní prvky: odsávání zplodin, ochranná skla, kompletní kryty, optické alarmy
- Ochranné pracovní pomůcky: certifikované brýle s adekvátním filtrem, reflexní rukavice,

Structure of cutting plant with fibre-coupled Nd:YAG laser

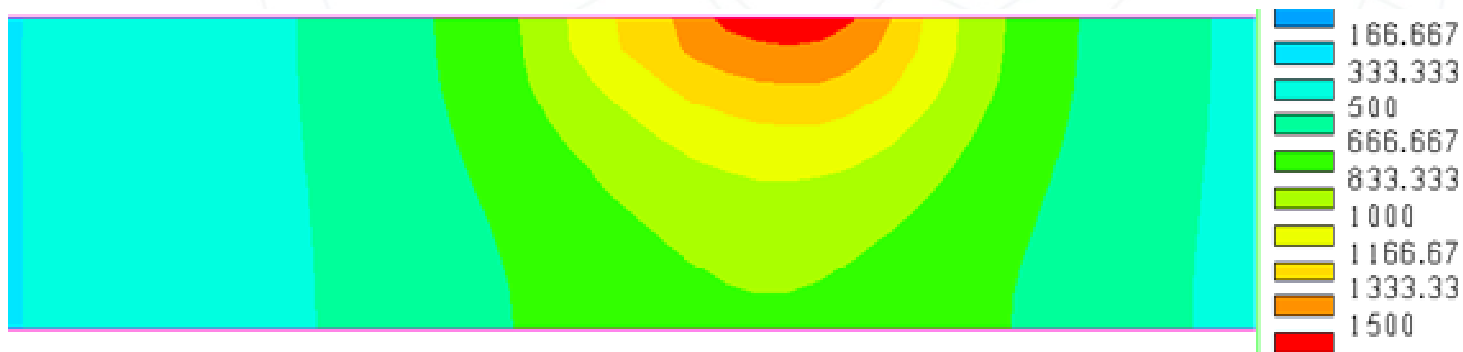
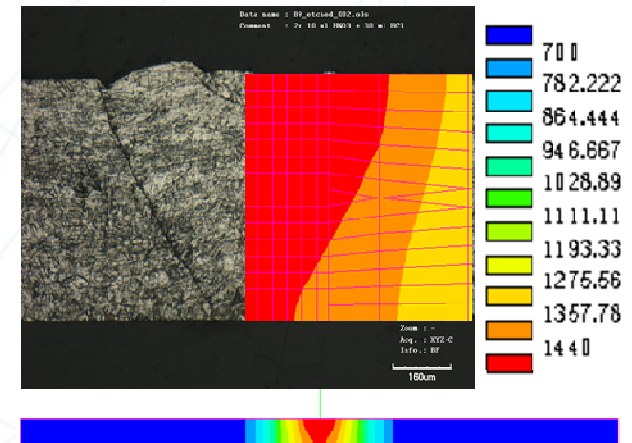
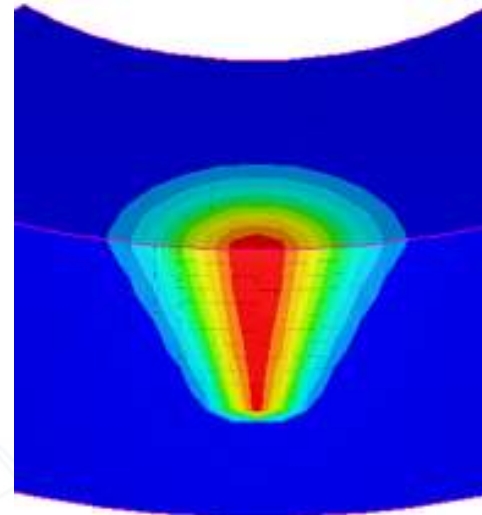
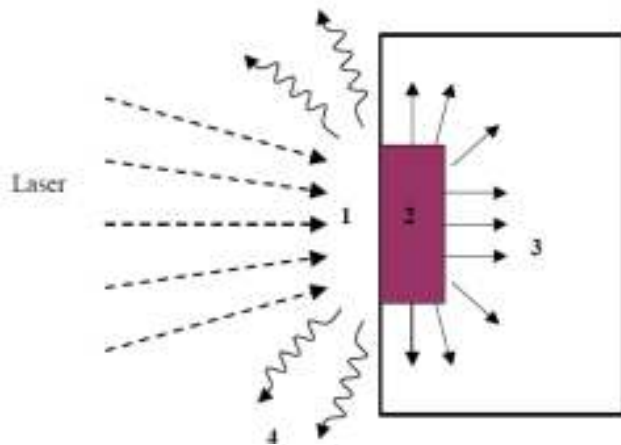


Structure of flat-bed CO₂ laser cutting plant



Lasery v průmyslových aplikacích – termální interakce s materiálem

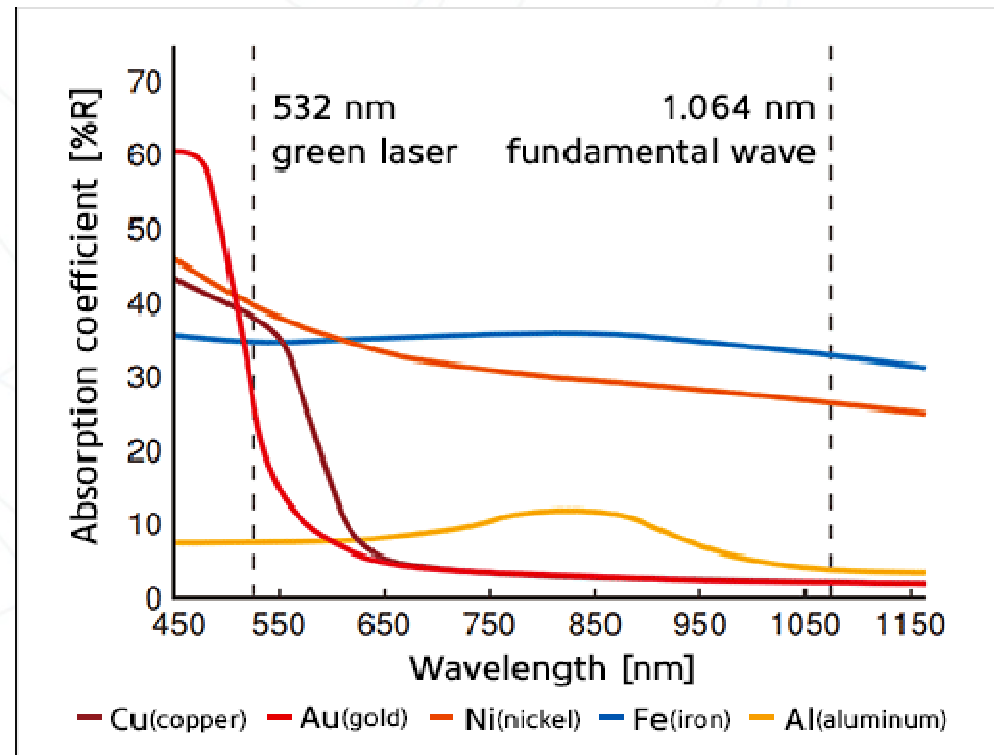
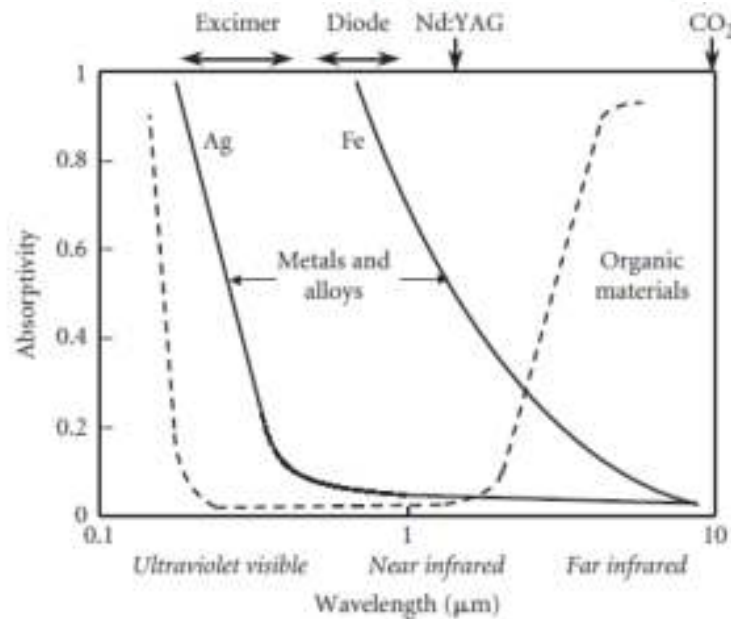
1. Záření je absorbováno, odraženo nebo propuštěno: $A + R + T = 1$
2. Absorbovaná část záření pronikne do hloubky řádově 10 nm a předá energii elektronům
3. Generuje se tepelný zdroj o průměru D a hloubce h
4. Dosažená teplota v povrchové vrstvě závisí na objemové hustotě energie E_{abs} (J/m^3), tepelné vodivosti, měrném teple a hustotě materiálu
5. Teplota do objemu materiálu se šíří podle parciální diferenciální rovnice vedení tepla



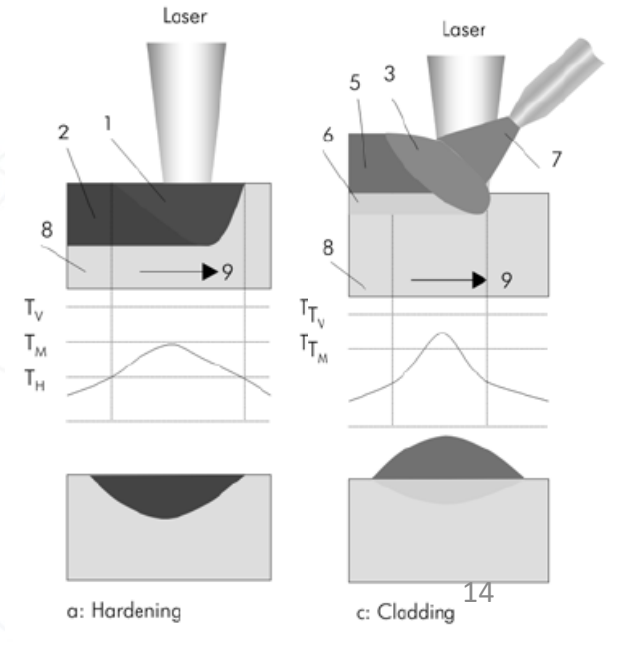
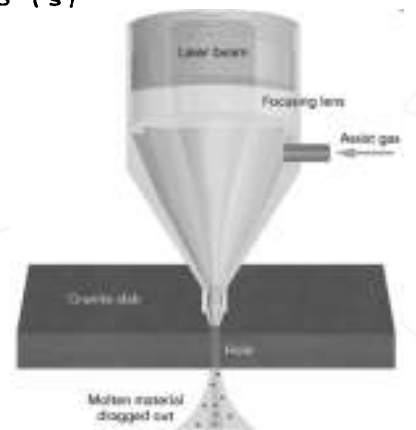
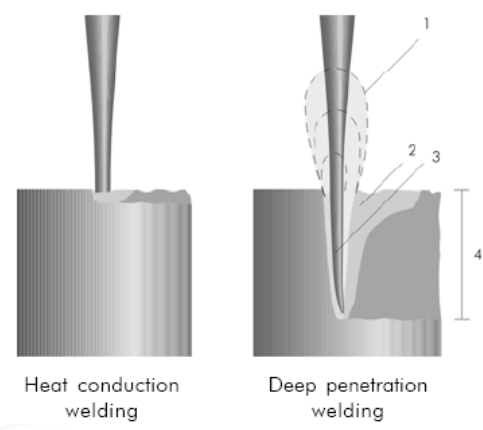
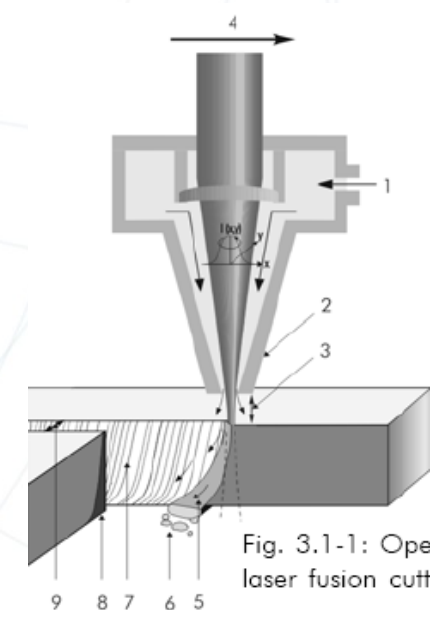
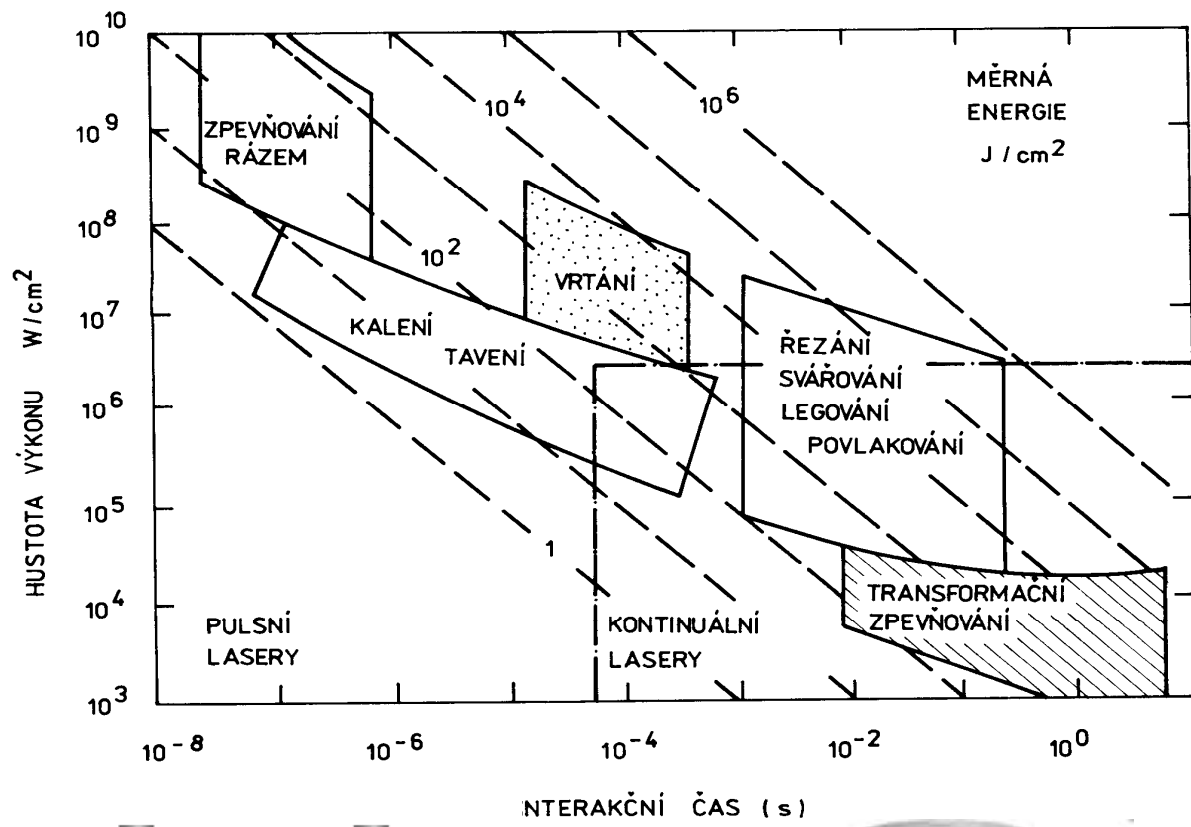
Lasery v průmyslových aplikacích - absorptivita materiálů

Absorptivitu určuje: vlnová délka a směr dopadajícího záření, typ materiálu a jeho chemické složení, struktura a počáteční stav materiálu (teplota, drsnost povrchu, stupeň oxidace a znečištění). Rozdělení materiálů do skupin:

1. Kovy: slitiny železa, hliníku, mědi, hořčíku, titanu, wolfram,.....(3,125 eV)
2. Keramika: (Al_2O_3 , Zr_2O_2 , NaCl - 1,85 eV); sklo (Si, SiO_2 - 4,8 eV)
3. Polymery: ($-\text{C}_2\text{H}_4-$) $_n$ PE, PVC, PP,.....) (4,9 eV - 6,4 eV)
4. Kompozity: dřevo, beton, laminát, uhlíkový kompozit



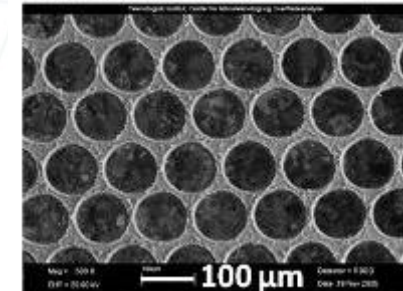
Lasery v průmyslových aplikacích - rozdělení laserových technologií



Lasery v průmyslových aplikacích - klasifikace podle fázové přeměny

skupina	plošná hustota výkonu	interakční čas	modifikace
strukturální změny (bez natavení)	10^3 W.cm^{-2}	10^{-2} s - 3 s	transformační zpevňování žihání injektáž příměsí a napařování
spojování (tavení až vypařování)	10^4 W.cm^{-2} - 10^5 W.cm^{-2}	10^{-3} s - 10^{-1} s	kondukční svařování tvrdé a měkké pájení hloubkové svařování
dělení (tavení až vypařování)	10^5 W.cm^{-2} - 10^7 W.cm^{-2}	10^{-4} s - 10^{-2} s	tavné řezání oxidační řezání sublimační řezání orýsování s následným zlomem
zušlechťení povrchu	10^4 W.cm^{-2} - 10^6 W.cm^{-2}	10^{-3} s - 10^{-1} s	přetavování legování a plátování leštění a strukturování
povrchová ablace	10^6 W.cm^{-2} - 10^8 W.cm^{-2}	10^{-6} s - 10^{-9} s	popisování a gravírování čištění selektivní odstraňování vrstev
výroba prototypů	10^3 W.cm^{-2} - 10^6 W.cm^{-2}	10^{-3} s - 10^{-9} s	slinování laminování vytvrzování

Teflon



T < T_m : cementace, žihání, kalení = transformační zpevňování

- 1) Difuze: např. cementace – sycení železa uhlíkem, po následném žihání vznikne tvrdá martenzitická struktura, jádro zůstane měkké a pružné, nitridace
- 2) Laserové transformační zpevňování: ohřev nad určitou teplotu (800 – 1 000) °C, transformace mřížky na kubickou plošně centrovanou, rozpouštění karbidů (Fe₃C) a přesun uhlíku do volnějších prostor v této mřížce. Následné rychlé ochlazení - transformace mřížky do původní podoby, krátká doba způsobí zamrznutí atomu v ne zcela rovnovážných a pravidelných polohách – vznik martenzitu.

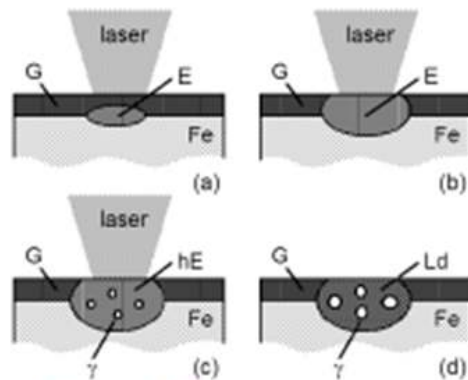


Figure 1: Laser carburizing.

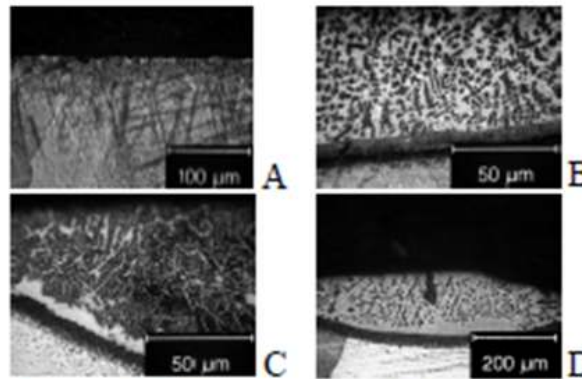
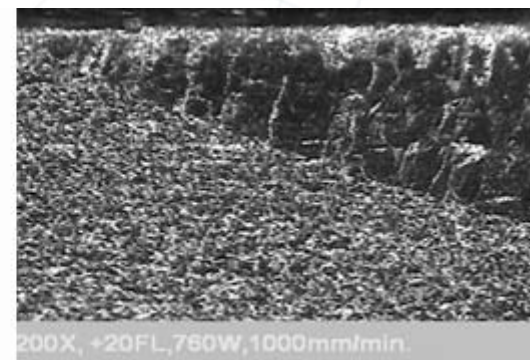
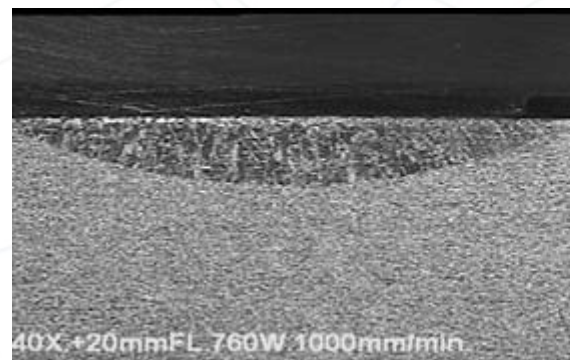


Figure 2: Microstructure of the samples.

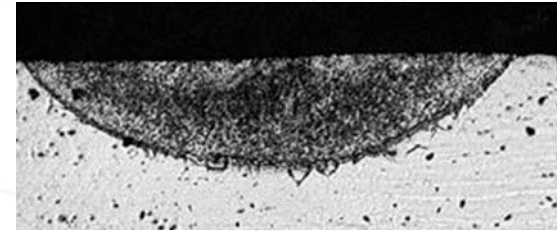


$T_v > T \geq T_m$: svařování, pájení

Rozdělení podle hustoty výkonu svazku:

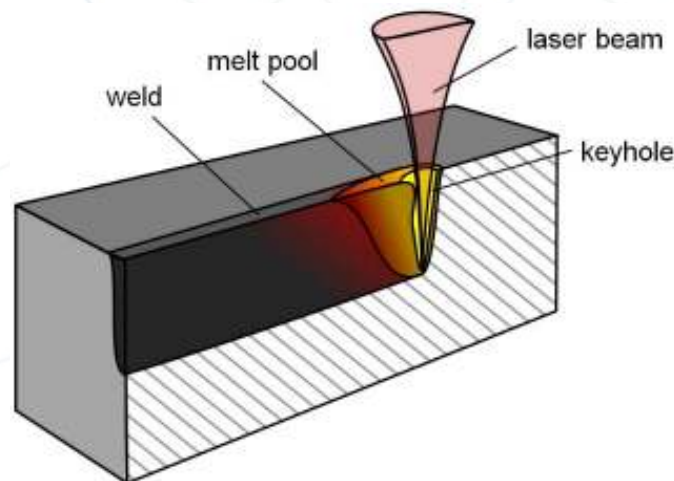
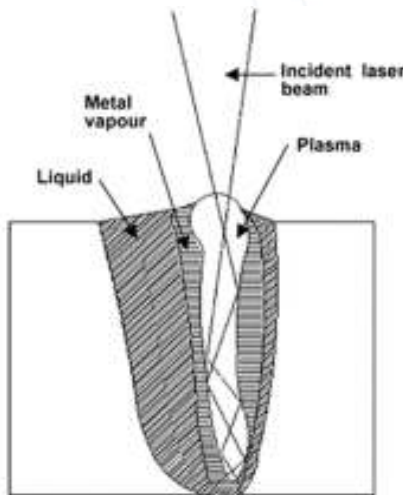
kondukční

- do 10^6 W.cm^{-2}
- dopad laserového svazku - lokální ohřev - natavení (aspoň 10^4 W.cm^{-2}) - vytvoření svarové lázně
- malá hloubka svaru (desetiny mm, šířka > hloubka), velmi hladký povrch
- Výroba miniaturních součástí (elektronika)
- přehřev! → vyšší penetrace



Keyhole - hloubkové

- nad 10^6 W.cm^{-2}
- dopad laserového svazku - lokální ohřev - odpaření - vytvoření dutiny (stabilizovaná tlakem vzniklých kovových par) - stěny tvořeny taveninou - absorpce laserového záření i na stěnách dutiny
- velký poměr hloubka:šířka



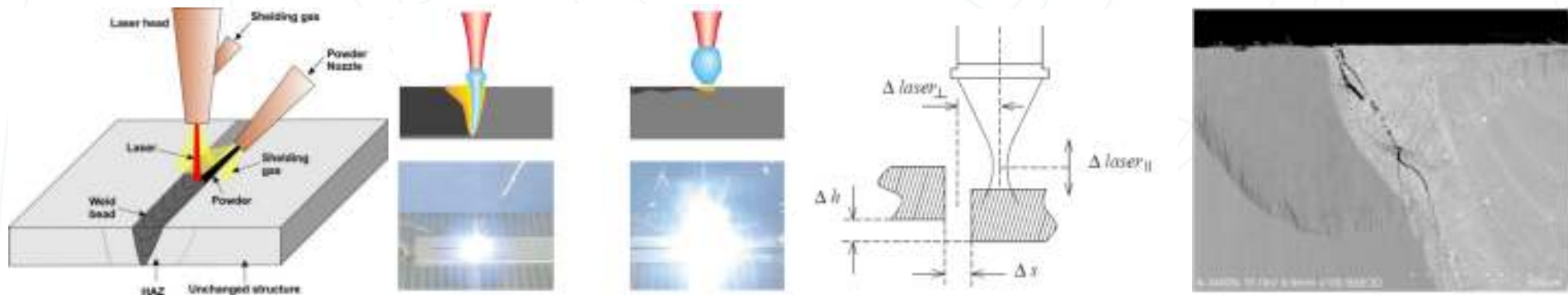
$T_v > T \geq T_m$: laserové svařování, pájení

Asistenční plyn: ochraňuje optiku před znečištěním, svar před oxidací a odfoukává plazma (argon, helium, CO₂, N, směsi), při velkém výkonu nebezpečí „stínění“ plazmatem ionizovaného plynu

Výhody: rychlost, přesnost, malé ovlivnění okolí svaru, dostupnost ploch v omezeném prostoru

Nevýhoda: nároky na přesné sestavení svaru a koincidenci stopy svazku s linií spoje (seam-tracking), rychlé ochlazování kondukcí tepla do okolního materiálu – možnost vzniku mikrotrhlin

Nové techniky: „REMOTE welding“ s fokusační čočkou $F = 500$ mm a lasery s kvalitním svazkem (5 x), svařování mědi „zeleným“ laserem, „WOBBLING“ – rozkmit stopy úzkého svazku podél linie svazku,



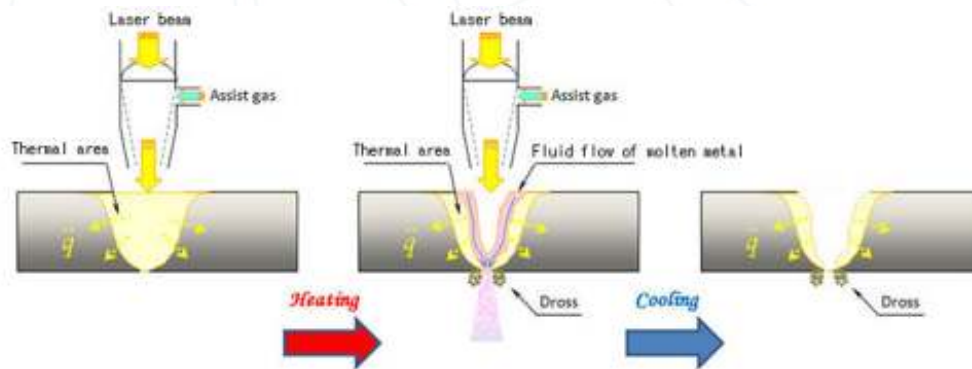
Wobble Mode	Schematic	Sample Weld
Circle (CW & CCW)	Wobble Welding Seam	
Linear	Wobble Welding Seam	
Eight	Wobble Welding Seam	
Infinity	Wobble Welding Seam	

$T_v \geq T \geq T_m$: laserové řezání

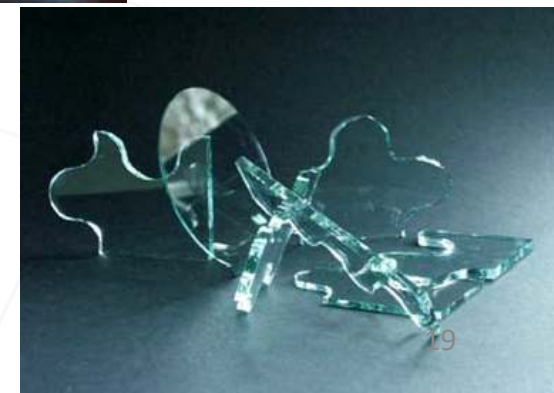
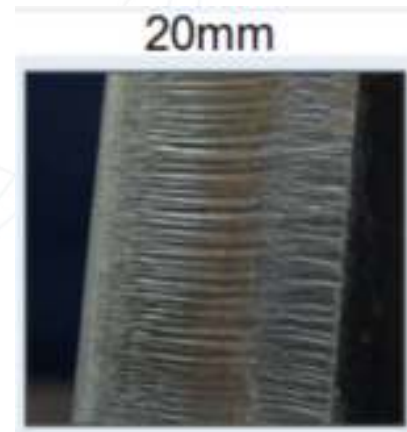
Oxidační: kyslík jako asistenční plyn o nižším tlaku (2 - 10) bar, exotermická reakce s železem zvyšuje dodanou energii – větší tloušťky až 40 mm, vyšší rychlosti, ale oxidovaná hrana řezu, výhodné pro nízkouhlikové oceli a titanové slitiny

Fúzní (tavné) : natavený materiál vyfukován vysokotlakým inertním plynem (Ar, N) o tlaku (10 – 50) bar, čistý řez, vhodné pro nerez oceli a barevné kovy,

Sublimační: dostatečný výkon pro odpaření/vyhoření materiálu ze spáry řezu, vhodné pulsní lasery (vysoký peak power), vhodné pro nekovové materiály (dřevo, plasty, keramika, sklo, papír, kůže – CO₂ laser) , ale nezbytné odsávání toxických výparů



Partnership research FY 2010. "Cutting of NPP internals using fiber laser technology & sophisticated decommissioning technology" will be launched as a framework

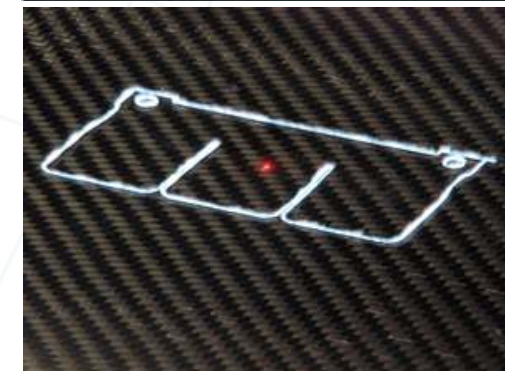
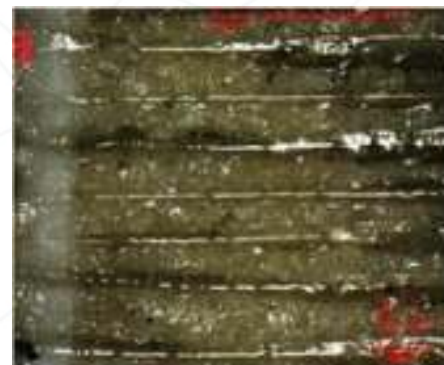
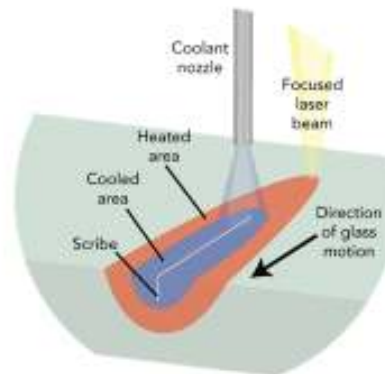
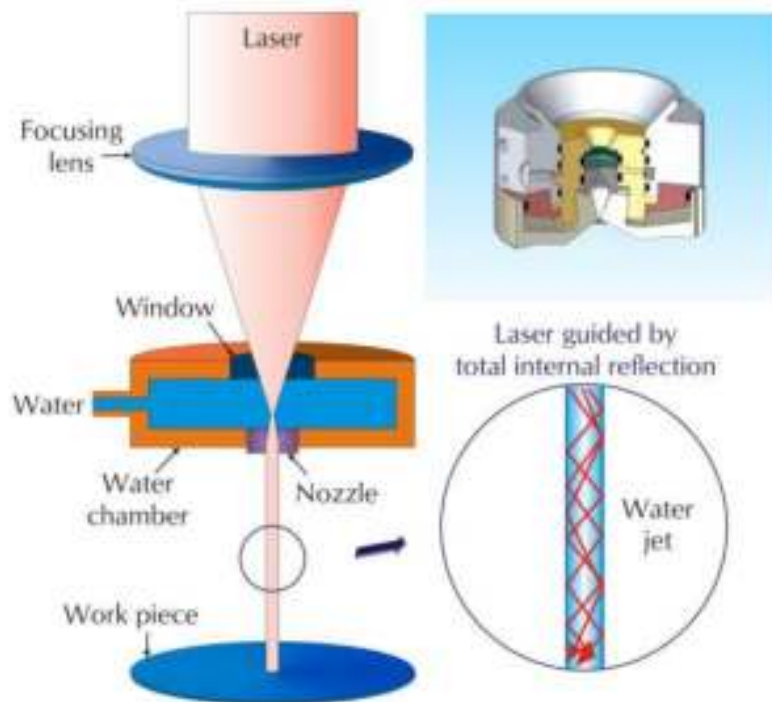


$T_v \geq T \geq T_m$: laserové řezání

Hybridní: laser + vodní paprsek, bez nutnosti asistenčního plynu, rovnoběžný svazek, patent SYNOVA

Nepřímé: tepelně indukované lomy – ohřev laserovým svazkem a bezprostřední ochlazení studeným vzduchem – vznik trhliny. Orýsování keramiky – vytvoření řady separovaných otvorů (částečných nebo kompletních) a následné rozlomení

Nové techniky: :“REMOTE cutting“ bez asistenčního plynu, postupnou ablací po 50 μm vysokorychlostním skenováním, vhodné pro tenké kovové a kompozitní materiály, nedochází k tepelnému ovlivnění.



$T_v \geq T \geq T_m$: laserové vrtání

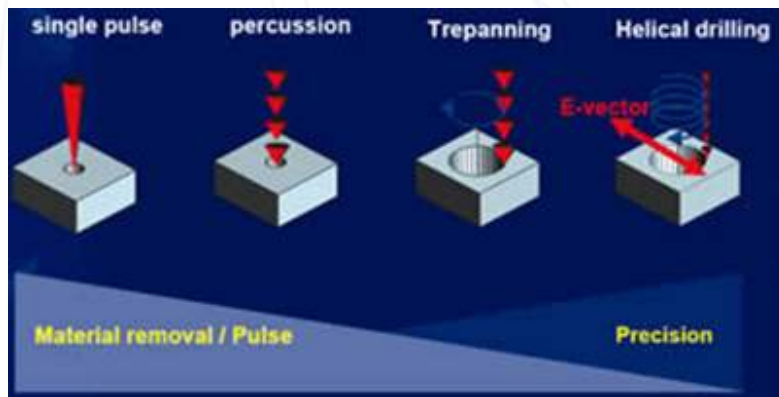
Singl puls: vysoký vrcholový výkon 10 – 100 kW, částečně natavený a částečně odpařený materiál je vyfukován z otvoru směrem vzhůru a tlačén směrem dolů vysokotlakým inertním plynem (Ar, N).

Perkusní: vrtání zvolenou sérií pulsů (burst) o menším vrcholovém výkonu, vyšší kvalita otvoru, limit otvoru je dán průměrem svazku

Trepanační: kombinace vrtání a řezání, propal ve středu a vyřezání otvoru kruhového nebo oválného tvaru vzájemným pohybem svazku a obrobku. Nejpomalejší !

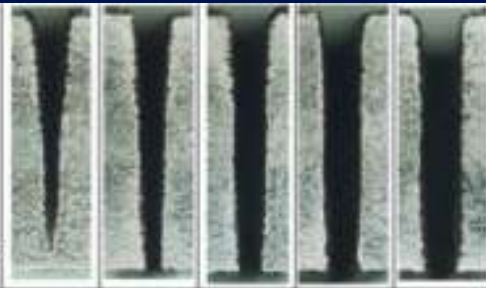
Spirálovité: odpařování materiálu postupným vykrušováním, eventuálně se zvyšováním energie, snižováním ohniska, svazek je rozmítán galvo zrcadly apod. Nejpřesnější !

Problémy: rozstřík taveniny na povrchu, mikrotrhliny, kuželovitost otvoru, u 3D objektů znečištění protilehlé stěny



Type S
CFRP
cross
section

0.5 mm

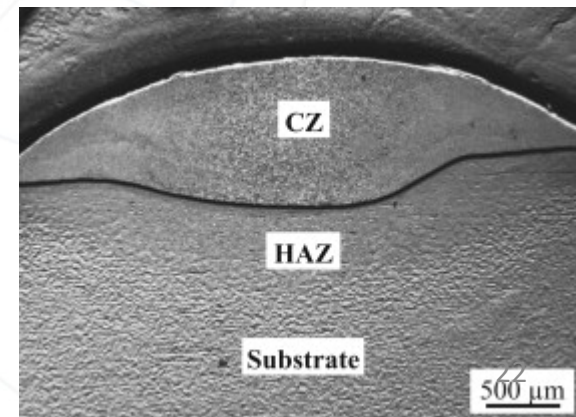
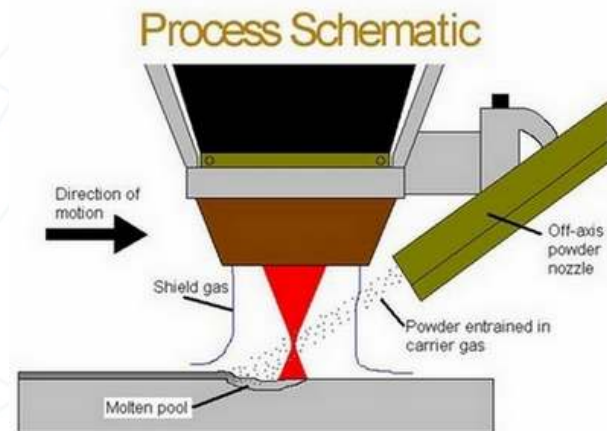
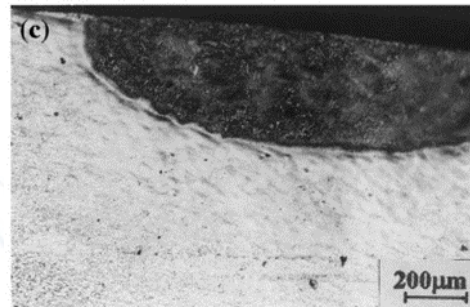


$T_v > T \geq T_m$: přetavení, legování, plátování povrchu

Přetavení (melting): rychlý ohřev (10^5 K.s^{-1}) a natavení stopy, vzniká teplotní gradient $10^2 - 10^4 \text{ K.mm}^{-1}$. poté ochlazování rychlostí 10^5 K.s^{-1} . Pro materiály, které nelze transformovat ohřevem (litina, keramika)

Legování (alloying): natavení povrchu s příměsí legovacího materiálu, vznik nové slitiny (Fe + Cr, Ni, S, nitridy), (C-Mn oceli + Cr, Ni, Ti, W, C)

Plátování (cladding): natavení vrstvy přidavného materiálu s velmi tenkou hraniční vrstvou. T_m podložky musí být větší než příměsí ! Forma příměsí: prášek, drát, blok . Aplikace: pre – depozice nebo foukání přímo do laserové stopy

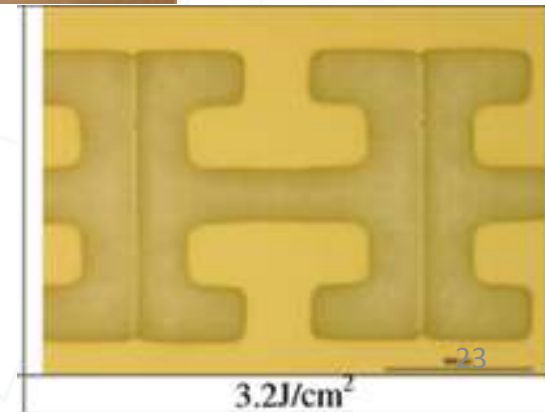
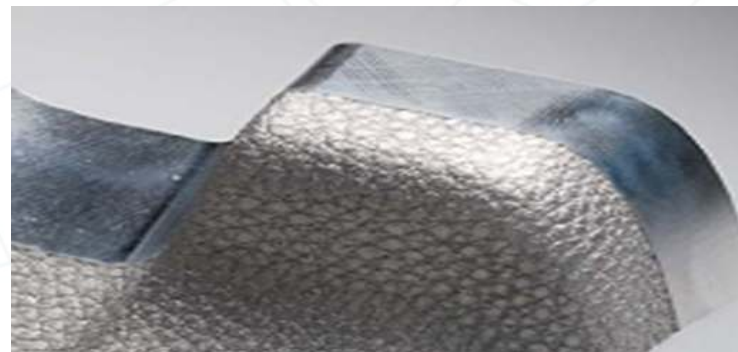
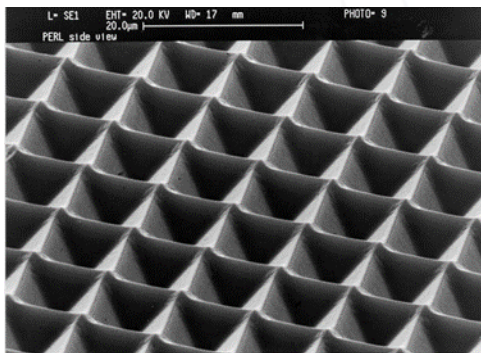


$T > T_v$: popis, gravírování, leptání povrchu

Popisování Q-switch lasery: pulsy o vysokém vrcholovém výkonu a délkou 10^{-9} až 10^{-6} s odpaří materiál v úzké naprogramované linii popisu, svazek rozmitán dvěma galvanometrickými zrcadly, kontrast v kovu tvoří přetavený materiál, v sendvičových plastech spodní vrstva kontrastní barvy

Gravírování, drážkování, strukturování povrchu: vytváří hlubší rýhy v materiálu, pro zvýšení přilnavosti lepených ploch, vzorování vstřikovacích forem pro plasty

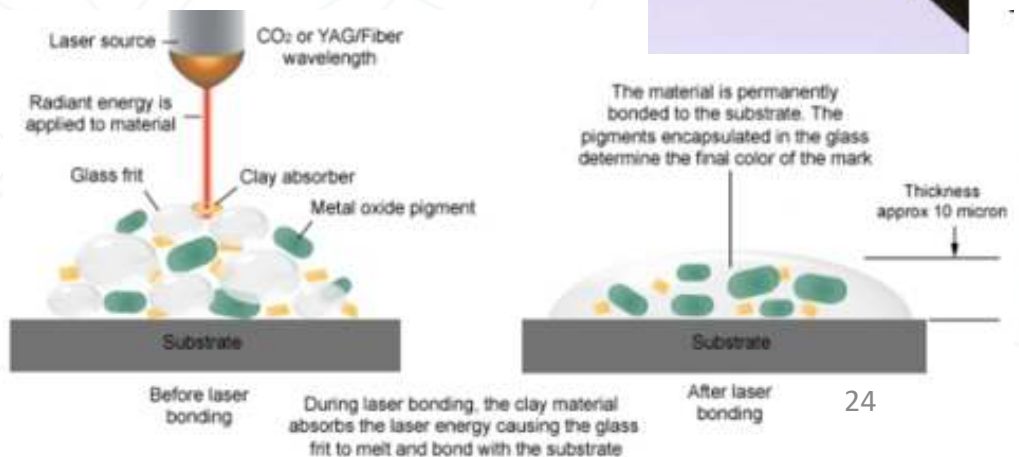
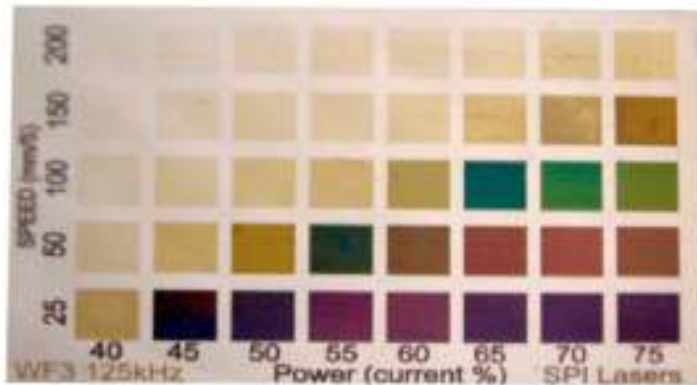
Leptání (etching): suchý proces např. při odleptání ITO (indium tin oxid) o tloušťce 100 nm ze skleněného substrátu pro ploché displeje v požadovaných oblastech)



$T < T_m$: Nedestruktivní značení povrchu

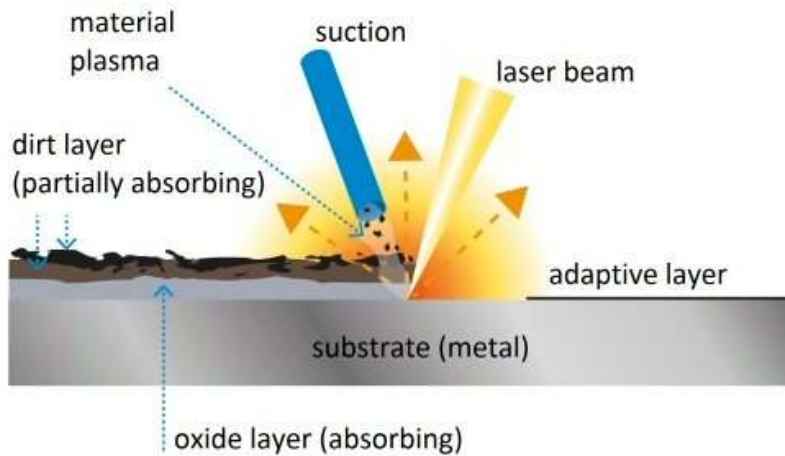
Barevné značení: Nerez ocel, titan, chróm a přechodové kovy reagují na tepelné ovlivněním změnou barvy povrchu v důsledku vytváření kysličníků. Barevný odstín závisí na kombinaci rychlosti a výkonu laserového svazku.

Selektivní glazurování (TherMark technology): aplikace směsi barviva a tepelného absorbéru ve formě pasty (štetec), aerosolu (sprej) nebo lepicí pásky na povrch předmětu, po zahřátí vybraných míst laserem vznikne během několika μs barevná vrstva, pevně spojená s podkladem chemickou vazbou (sklo, keramika, kovy, plasty). Výsledkem je stálý popis s vysokým kontrastem a vysokou odolností proti teplu, chemickému a mechanickému poškození. Přebytný materiál je následně odstraněn a recyklován.



$T > T_v$: Laserové čištění – ablace nečistot

Laserové čištění – ablace (odtržení) tenké povrchové vrstvy nečistot bez porušení objektu, možné za použití vody (laserové parní čištění). Q-switch lasery (100 ns, vysoký vrcholový výkon), linearizovaný skenovaný svazek. Povrchy kovových licích forem a nástrojů, kamenných stavebních a uměleckých objektů, apod.

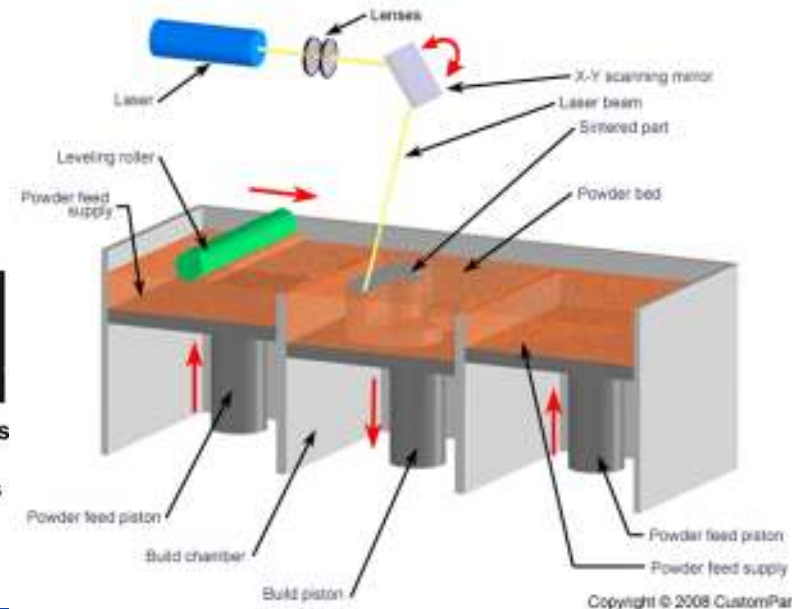
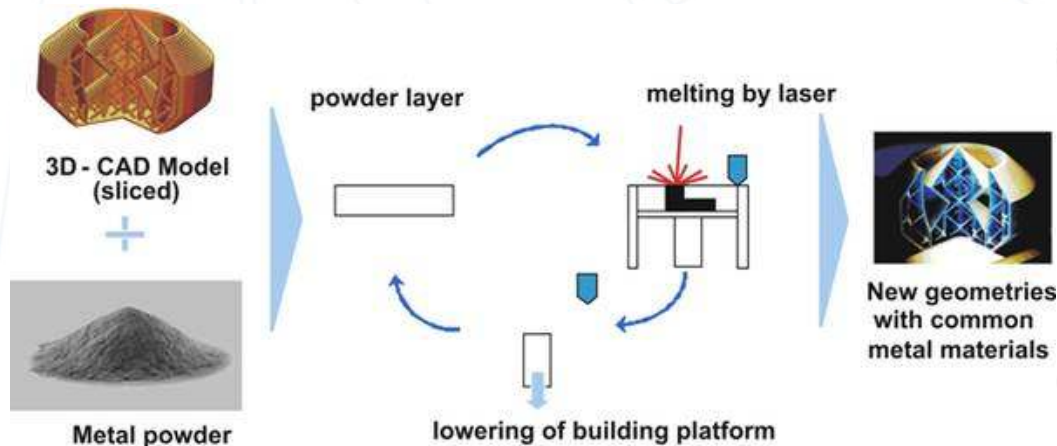


SALVATORE SIANO/A GIUSTI, OPD

$T_v > T \geq T_m$: 3D tisk z kovového prášku (SLM - selective laser melting nebo AM – additive manufacturing , mold repairing - opravy licích forem

Postupné zapékání kovového prášku v místě dopadu skenujícího laserového záření. Tloušťka vrstvy (20 – 100) μm , inertní atmosféra, materiály Cu, Ti, W, Al, Ag, ocel nástrojová i nerez. Časové náročné ale minimální odpad. Tvarově velmi komplikované díly a sestavy, které jsou jinak tradičními metodami (odléváním, obráběním) nerealizovatelné.

Uprint 3D Holic - <http://www.uprint3d.cz/>



Stereolitografie – vytvrzování fotosenzitivní pryskyřice UV laserem

LSLA – laserová stereolitografie, metoda pro „rapid prototyping“. Postupné vytvrzování fotosenzitivní pryskyřice (UV vlnové délky) v místě dopadu skenujícího laserového záření na tenkou vrstvu tekuté pryskyřice ve speciální vaně. Elementem tvaru jsou kapky cca 0,2 mm x 0,7 mm s překrytím 30 %. Předpoklad vysoce přesný CAD model a CNC program pro skenování laserového svazku, nutno vytvářet podpůrné můstky uvnitř dutých tvarů. Po vyoření modelu z vany žihání pod UV lampou, event. leštění.

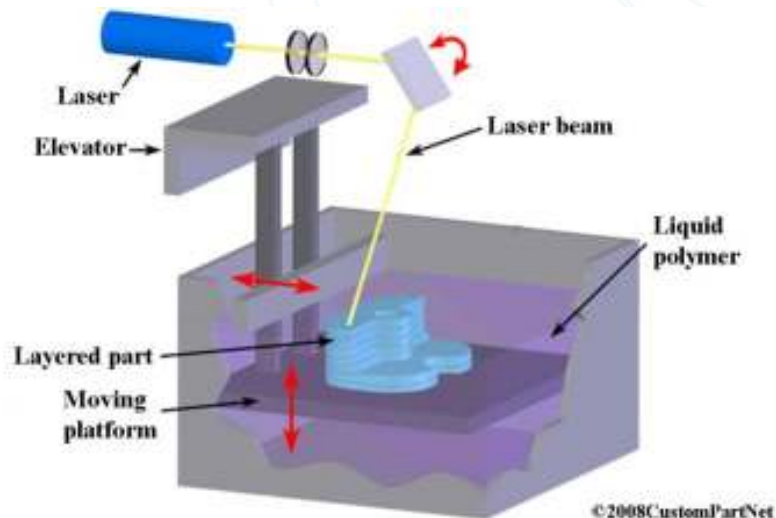
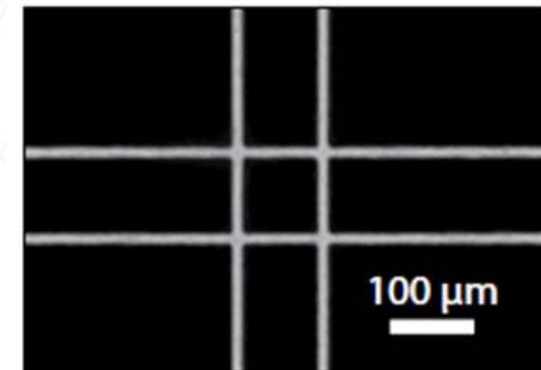
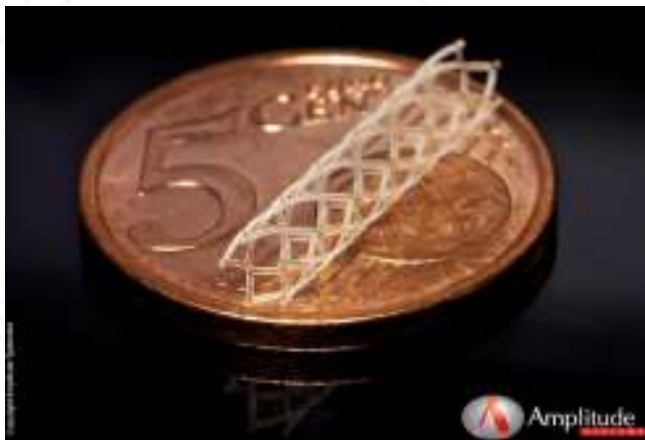
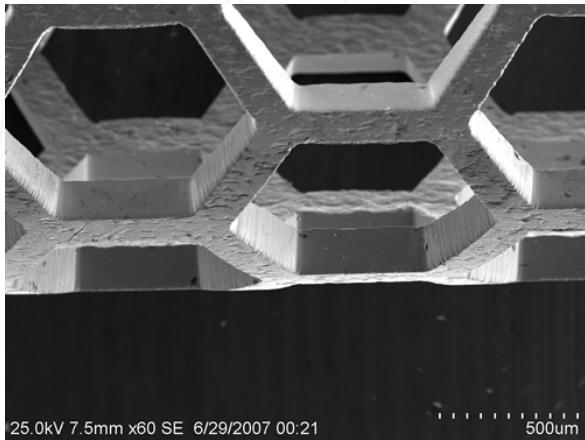


Fig. 1 Stereolitografie konceptu 111

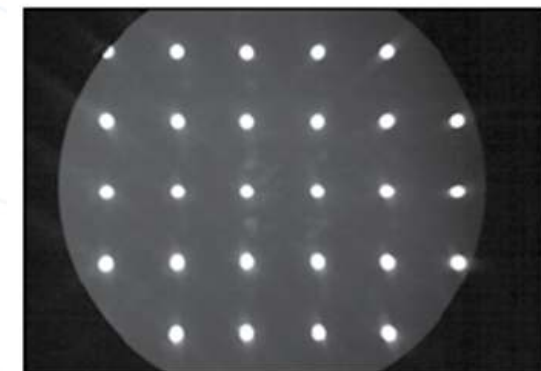
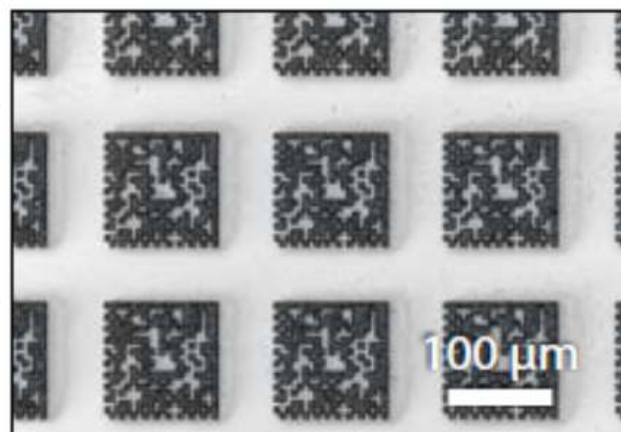
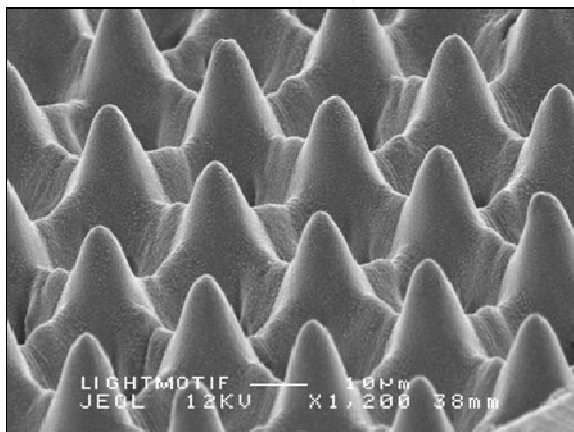
Inovace technologií: fotochemické zpracování ultrakrátkými pulsy (mode-locking - klíčované diodové a vláknové lasery)

Vývoj a výroba femto- a pico- sekundových laserů pro průmyslové aplikace (dříve pouze excimerové lasery s malou účinností) – prudký rozvoj mikro-technologií (řezání kardiovaskulárních stentů, biokompatibilních materiálů, selektivní ablace sendvičových materiálů, vrtání křehkých materiálů, strukturování povrchu,...

Průměry svazku (5 μm – 20 μm), skenování laserového svazku po obrobku



Titan coating selective ablation

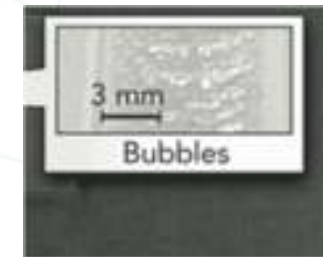
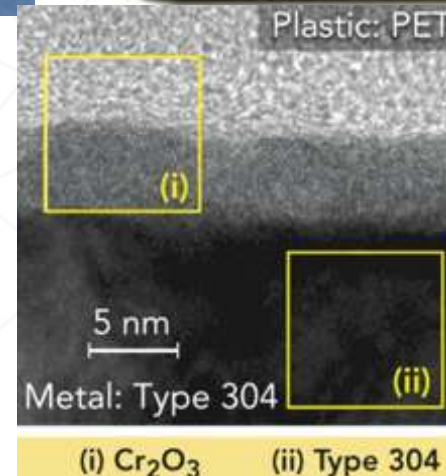
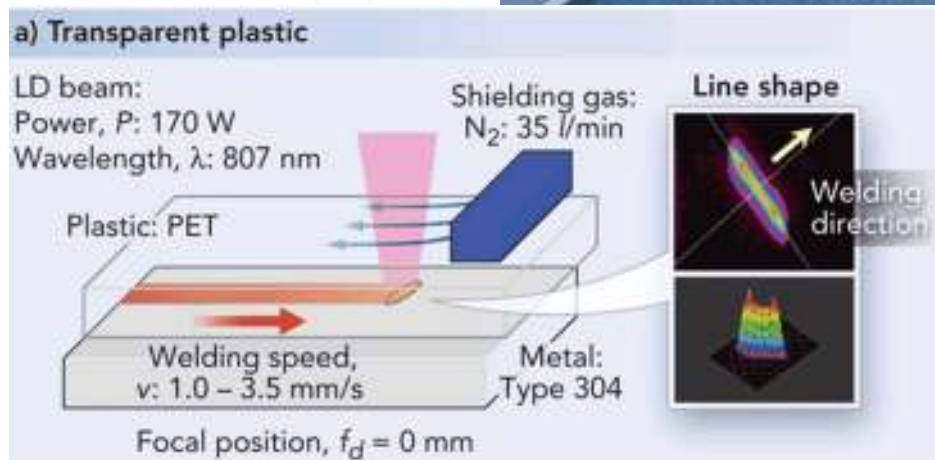
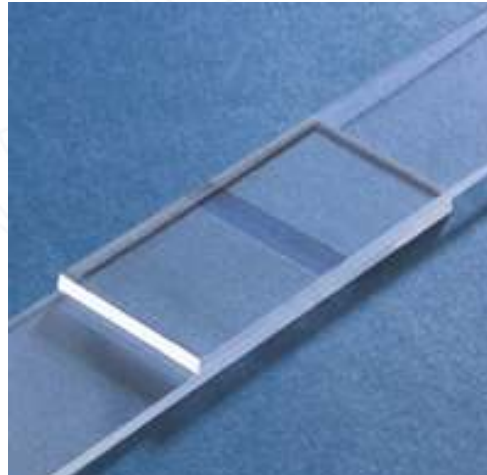
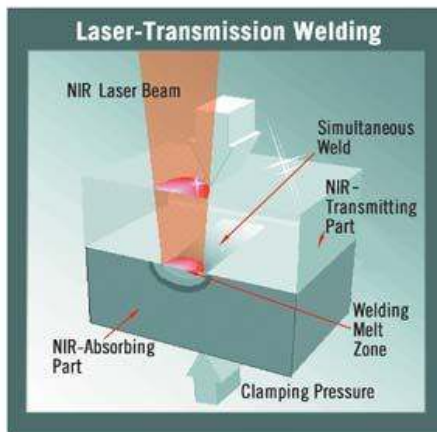


Apperture array fabrication

Inovace laserových technologií: Transmisní svařování plastů

Plast + plast : „Top Hat“ svazek diodových laserů ($D = 0,6 \text{ mm} - 5 \text{ mm}$ nebo linearizovaný), tloušťka materiálu obvykle $1 \text{ mm} - 2 \text{ mm}$. Horní díl transparentní, dolní zbarvený nebo natřený NIR absorbentem, vznik taveniny na rozhraní dílů a následného pevného spoje (Gentec Corp. Clearweld, BASF Group, Leister – mikro-fluidická zařízení pro separaci chemického vzorku)

Plast + kov: vhodný polymer a kov, indukovaný ohřev plastu kovem, vytvoření chemické vazby (identifikace Cr_2O_3 v přechodové vrstvě)



Inovace technologií: syntéza a úprava nanočástic

Syntéza: femto-sekundový laser je fokusován na základní materiál (Au), uložený ve vhodném roztoku (deionizovaná voda, methanol).

Úprava: NP získané jinou technologií jsou zmenšeny a upraveny na sférický tvar

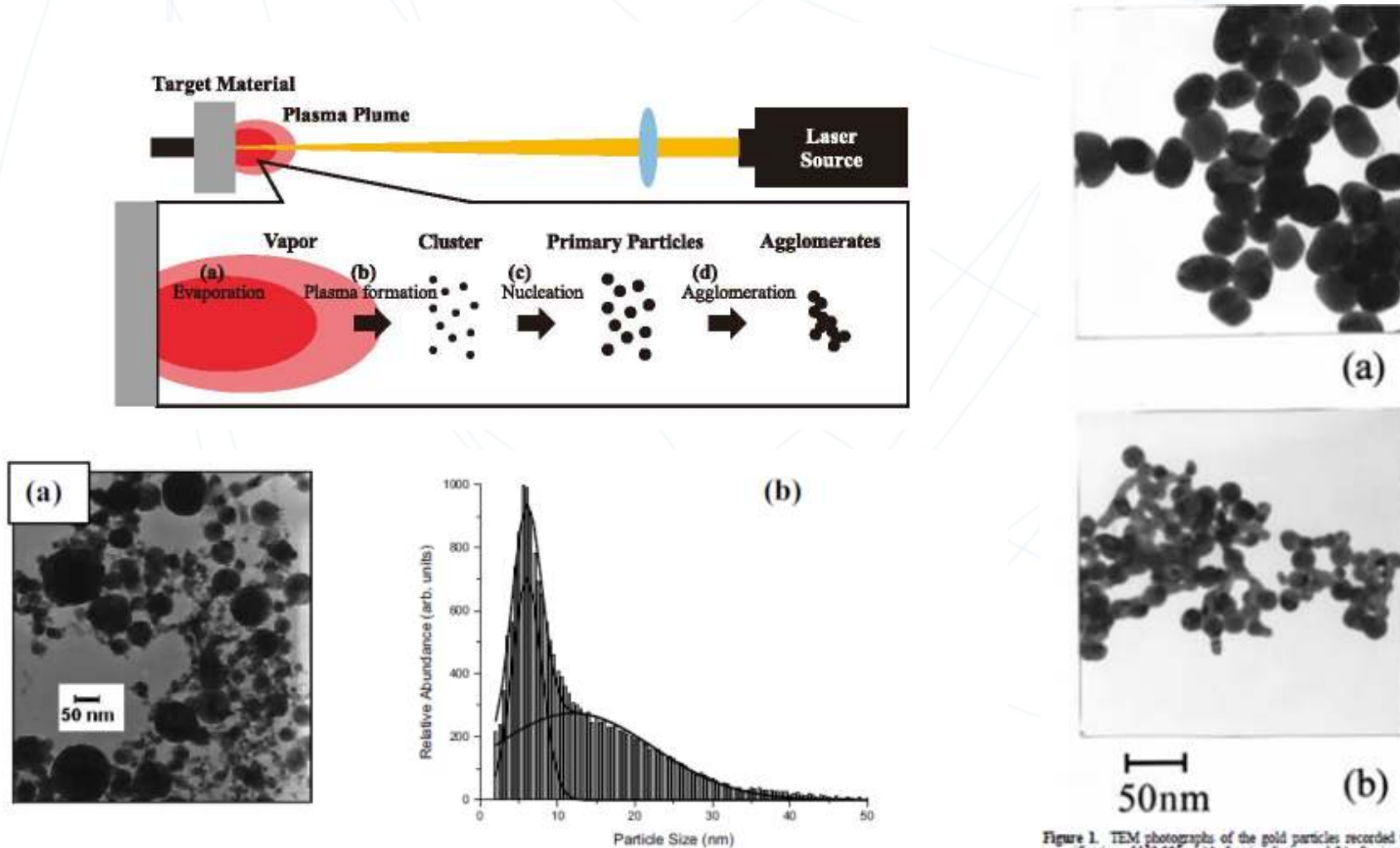


Figure 1. TEM micrograph images and corresponding size distributions of Ag nanoparticles prepared by the fs ablation in water at 160 J/cm^2 .

Figure 1. TEM photographs of the gold particles recorded with a magnification of 150 000: (a) before irradiation and (b) after irradiation with 210 mJ cm^{-2} and 10 Hz for 10 min.