

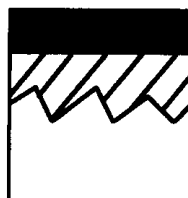
Čištění laserem



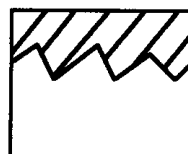
Čištění laserovým paprskem

Nd:YAG
Excimer
Er:YAG
Pulsní CO2

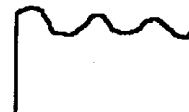
Black crust
Patina
Calcite



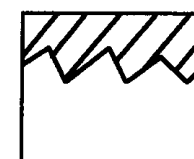
Weathered profile



Ideal cleaning



Conventional
cleaning



Laser cleaning

Průmysl:

Polymerní povlaky
Koroze
Ropné produkty
Částice nečistot
Dezinfekce

Ochrana KD:

Koroze
Inkrustace
Sediment
Mikroorganismy
Graffiti
Přemalby

Čištění laserovým paprskem

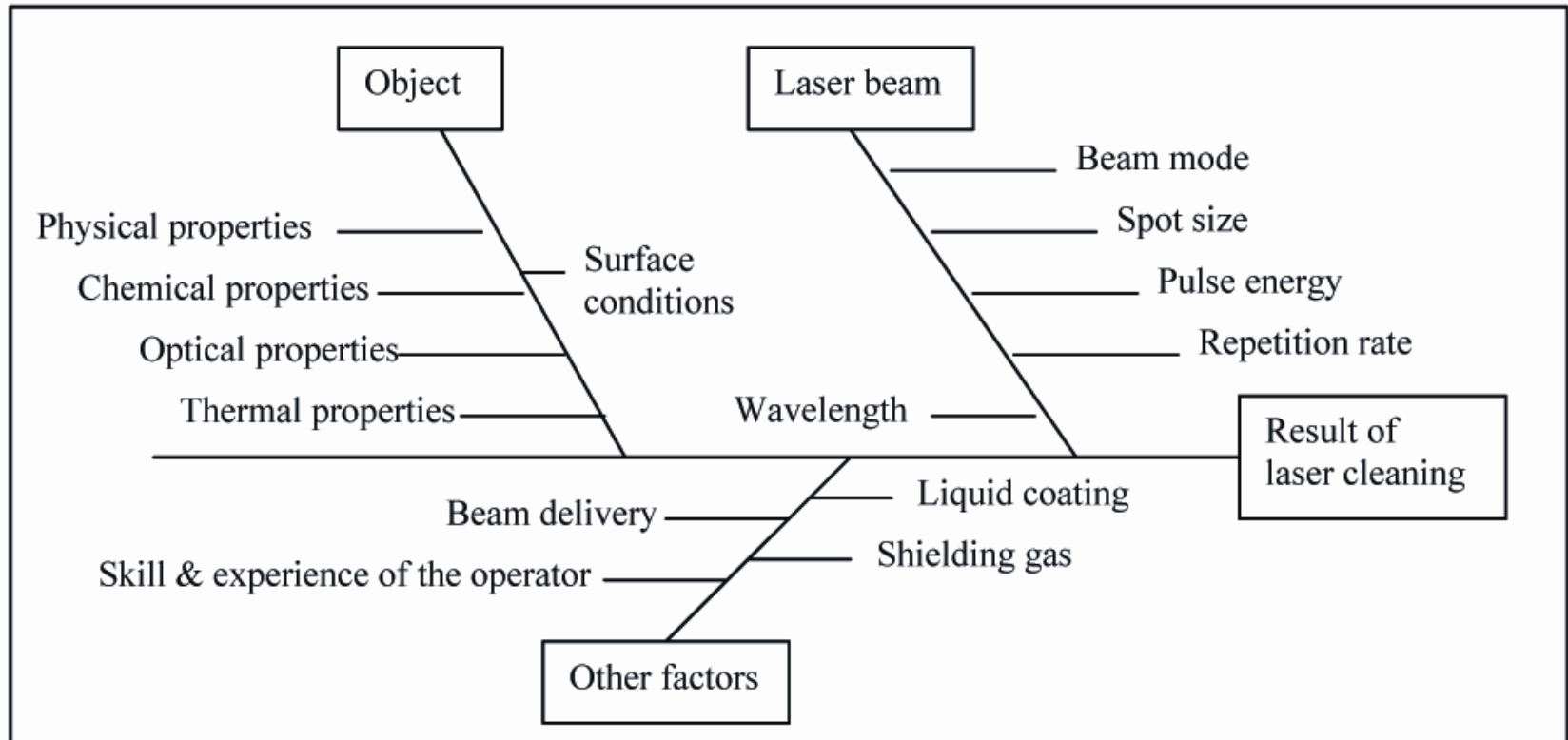
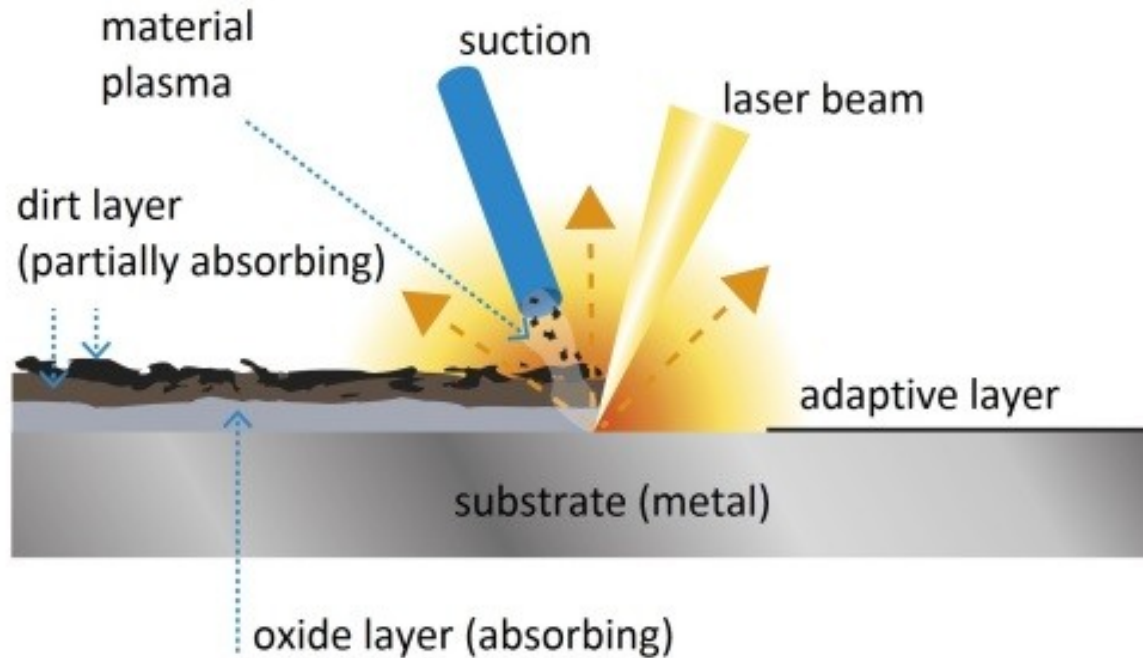


Figure 4. Ishikawa diagram of the factors affecting the laser cleaning process

Mechanismy čištění laserem



Fokusace laserového paprsku

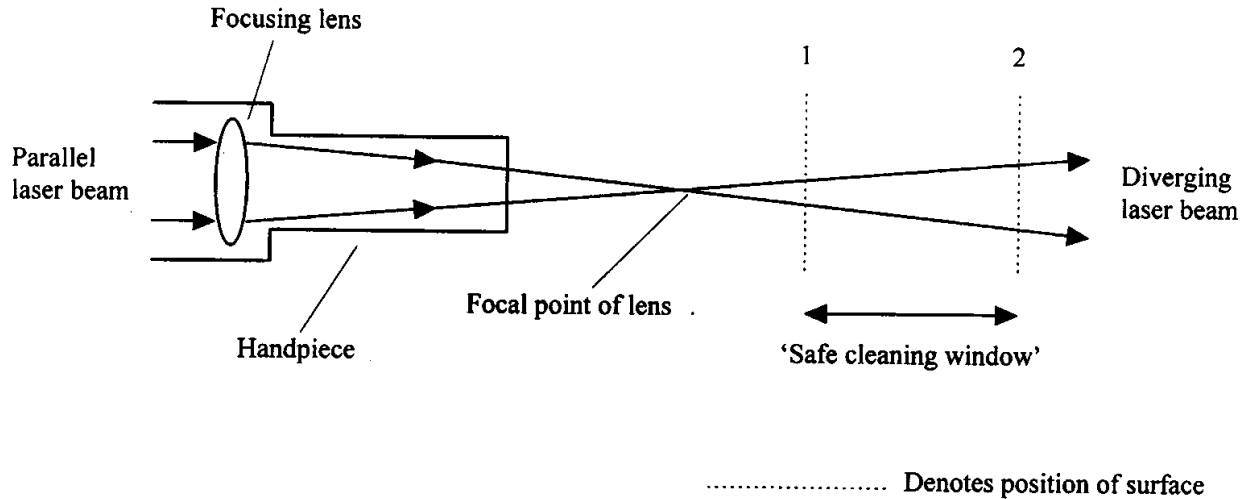
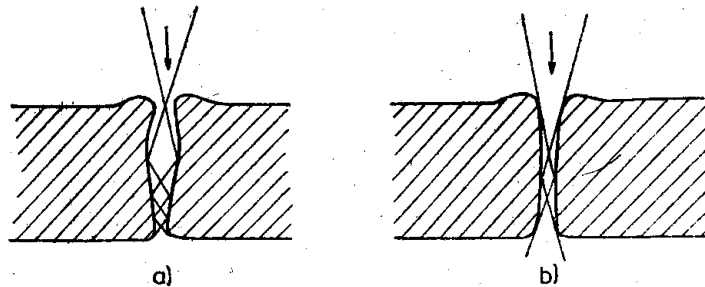


Figure 4.2. Schematic representation of cleaning with a diverging laser beam.



Obr. 64. Řez kráterem vypáleným laserovým svazkem při různých polohách ohniska fokusační techniky: a) ohnisko při povrchu materiálu, b) ohnisko pod povrchem

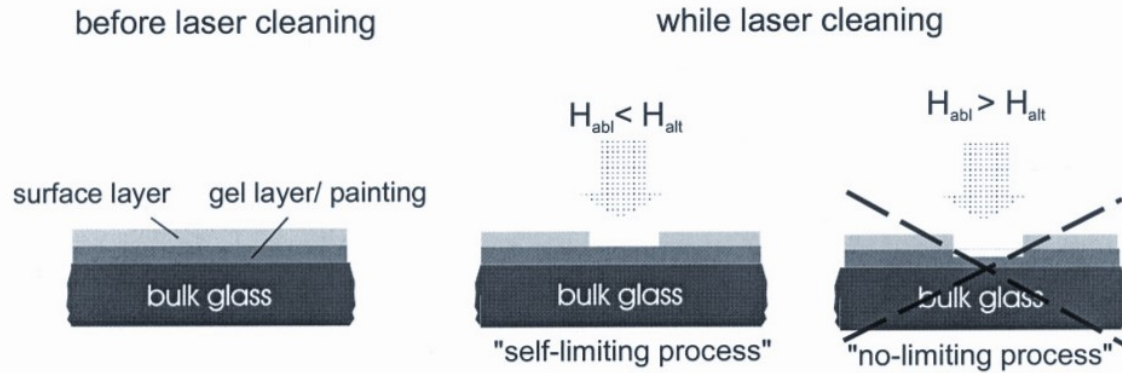
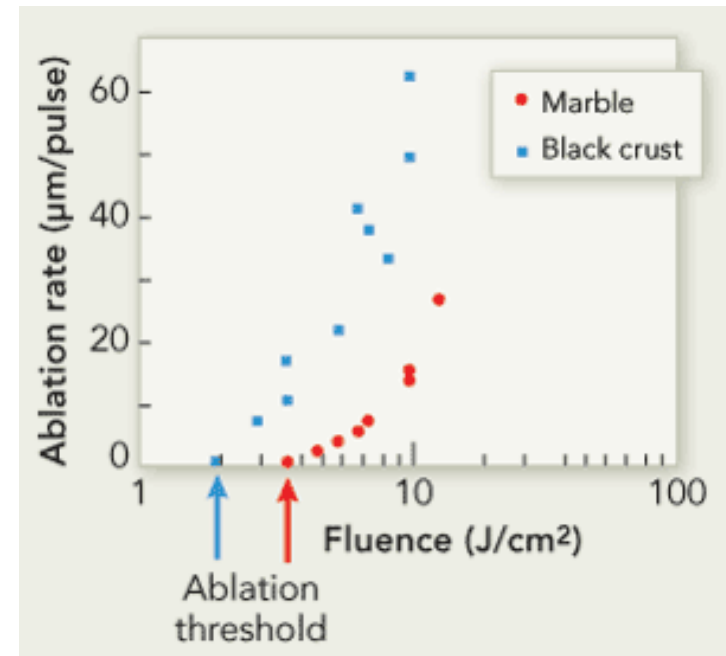
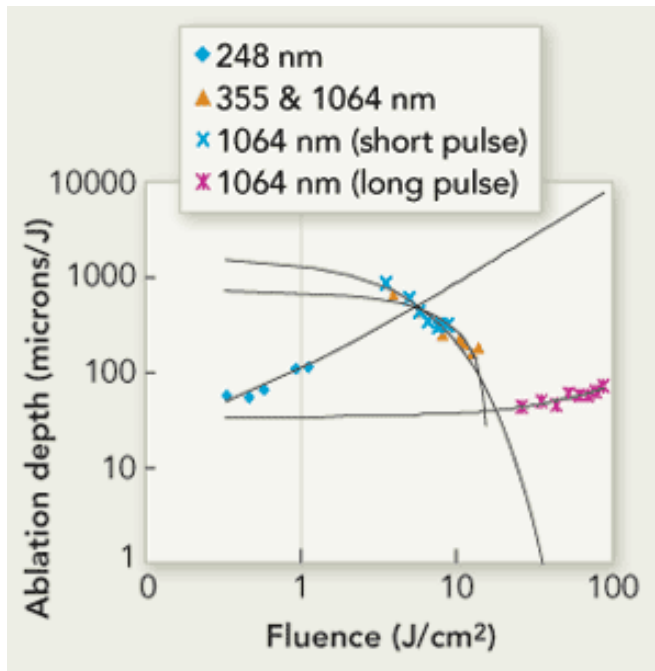


Figure 6. Schematic presentation of the assumed ablation characteristics of different layers and the consequences for the ablation process (H_{abl} = ablation threshold, H_{alt} = alteration threshold).



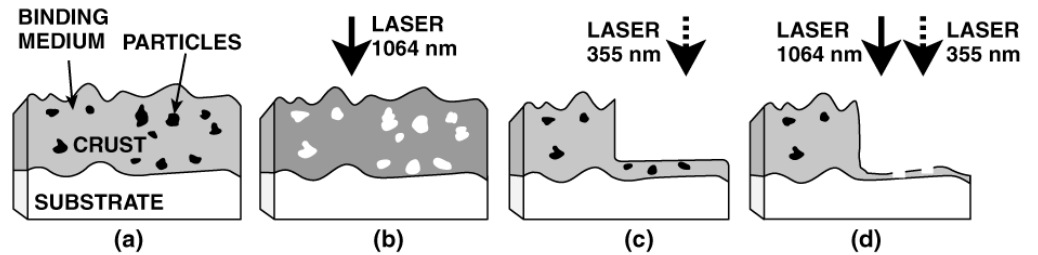
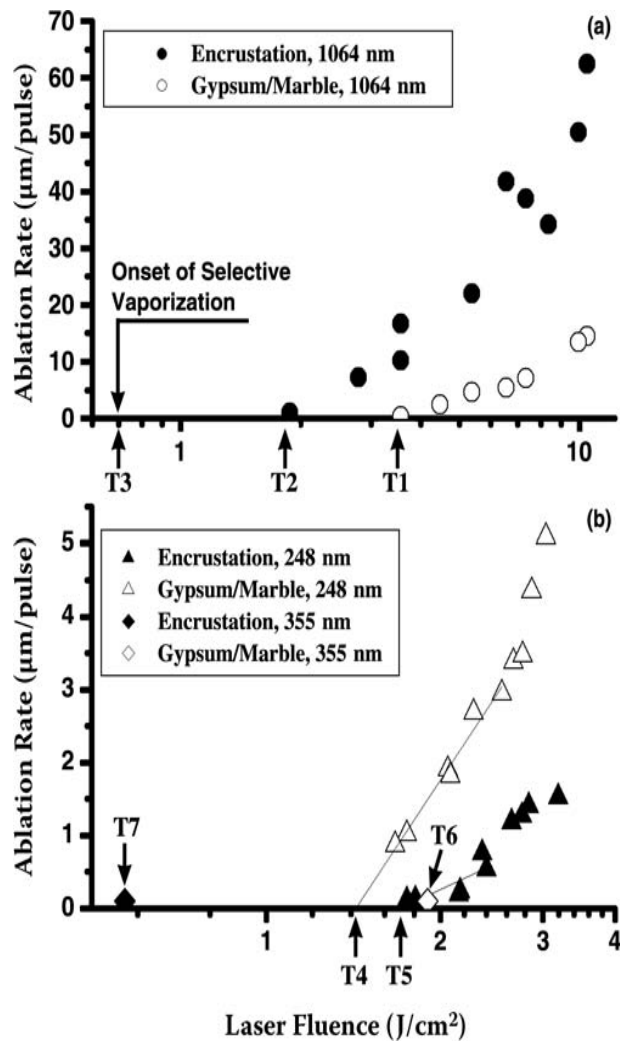
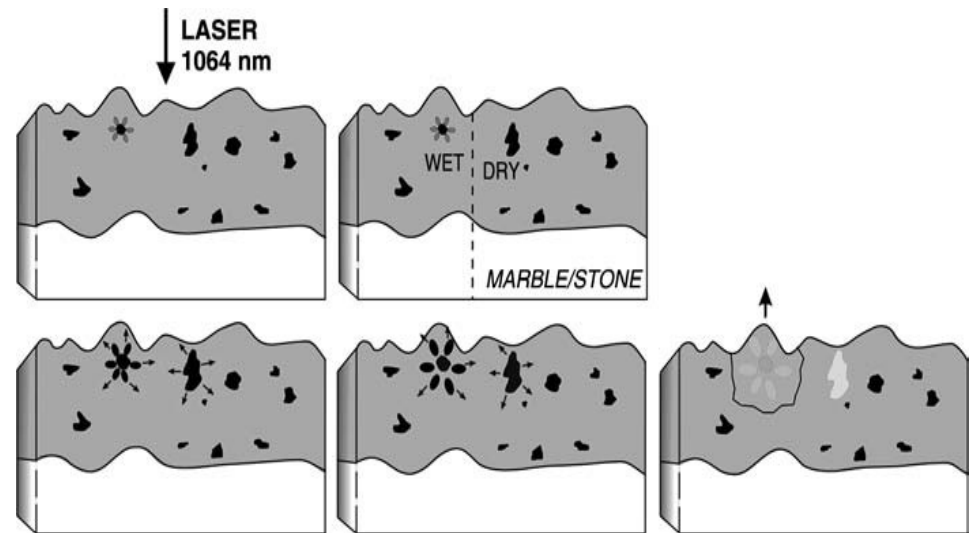
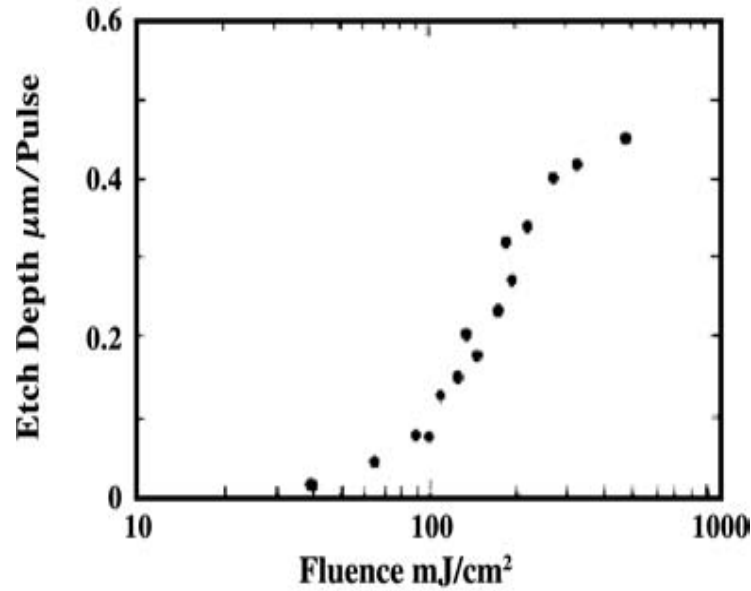
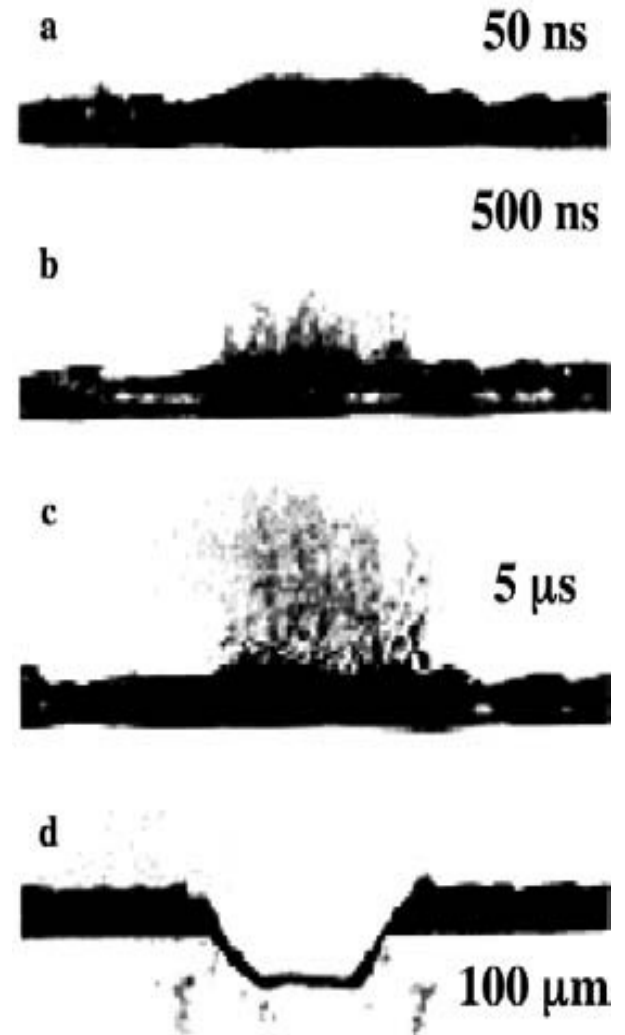


FIGURE 8.6 Schematic representation of encrustation cross section (a) and the two different ablative mechanisms: the selective vaporization using low fluence ($0.7\text{--}1.0 \text{ J}/\text{cm}^2$) at $\lambda_L = 1064 \text{ nm}$ (b), and the spallation at higher fluence ($\sim 2 \text{ J}/\text{cm}^2$) or using $\lambda_L = 355 \text{ nm}$ (c). (d) represents the result when synchronously using both wavelengths at certain fluence values.





Time-resolved photography of the material ejection process upon irradiation of a doped polymer (248 nm).



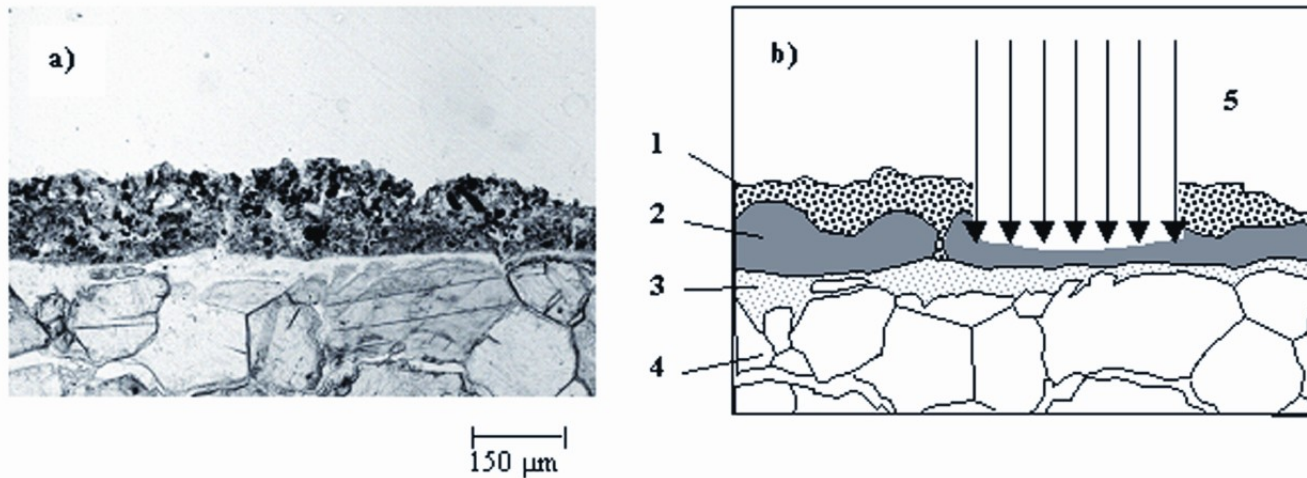
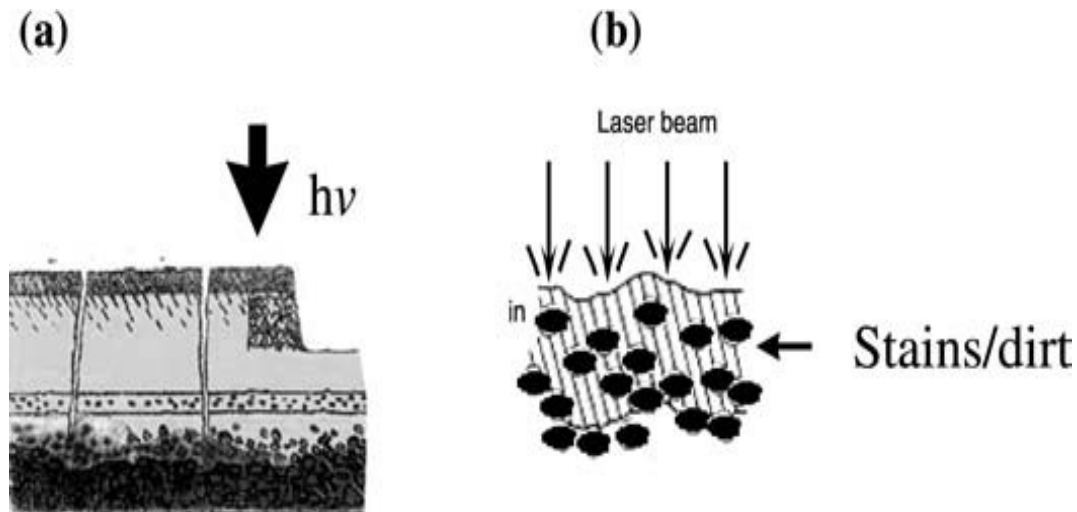


Figure 1.

a) Example of stratigraphy of a deteriorated marble observed by an ultra thin section.

b) Descriptive scheme: 1) black crust, 2) sulphated Ca-oxalates film (showing **craquelure**), 3) surface pseudomorphic sulphation layer i.e. reproducing the shape of the original surface, 4) calcite crystals with intergranular decohesion, 5) laser cleaning proceeds in a controlled way down to the oxalate layer.



Schematic of (a) degraded coating removal from a painted artwork (i.e., case of removal of a coating) and of (b) isolated absorbing impurities/stains from a substrate.

OPTICAL ABSORPTION

Below vaporization threshold

$t_L \sim 1-10 \text{ ns}$, $t_L < t_{st}$
 10^7-10^8 W/cm^2

Pressure
confinement

High pressure
gradient at
the interface

Impulsive ejection

$t_L \sim 1-10 \text{ ns}$, $t_L > t_{st}$
 10^7-10^8 W/cm^2

Thermoelastic
expansion

Double phase
pressure wave

Spallation

Above vaporization threshold

$t_L \sim 1-100 \text{ ns}$
 10^7-10^9 W/cm^2

No breakdown

Thermoelastic
phase

Fast thermal
explosion

Explosive removal
Recoil stress

Breakdown

Ionization
Dense plasma

Plasma
expansion
Shock wave

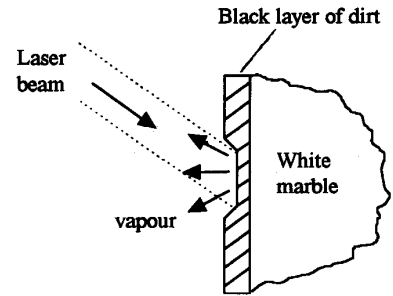
Strong recoil
Mechanical destr.

$t_L \sim 1-10 \mu\text{s}$
 $1-10 \text{ J/cm}^2$

Possibility of a
rarefied plasma

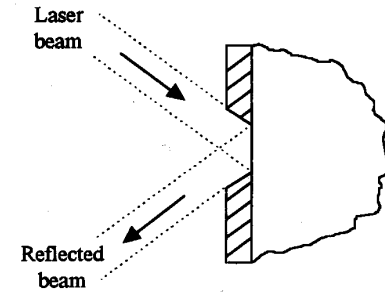
Quasi-sonic
expansion

Fast vaporization



Absorption of laser beam

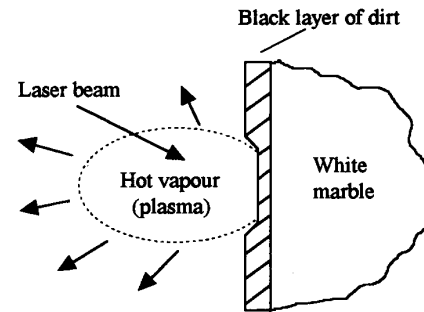
Initial interaction of long pulse radiation with a dark encrustation. Strong absorption of energy leads to vaporisation of material.



Reflection of laser beam

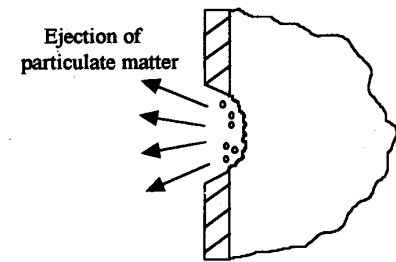
Final interaction of long pulse radiation with a dark encrustation. Once the encrustation has been removed further pulses are reflected from the weakly absorbing marble surface.

Figure 1.3. Normal-mode cleaning (Asmus, 1973).



Beginning of laser pulse

Vaporisation of encrustation occurs early during the pulse, leading to formation of a plasma. The temperature and pressure of the plasma increase rapidly as the incoming laser radiation is absorbed and a microscopic compression is applied to the surface.



End of same laser pulse

As soon as the laser pulse finishes the plasma expands away from the surface. The surface relaxes and a thin layer of material is ejected.

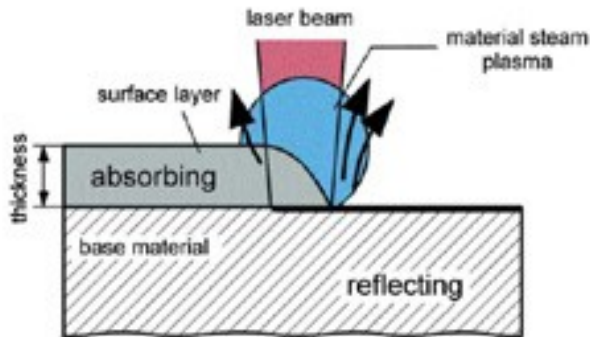
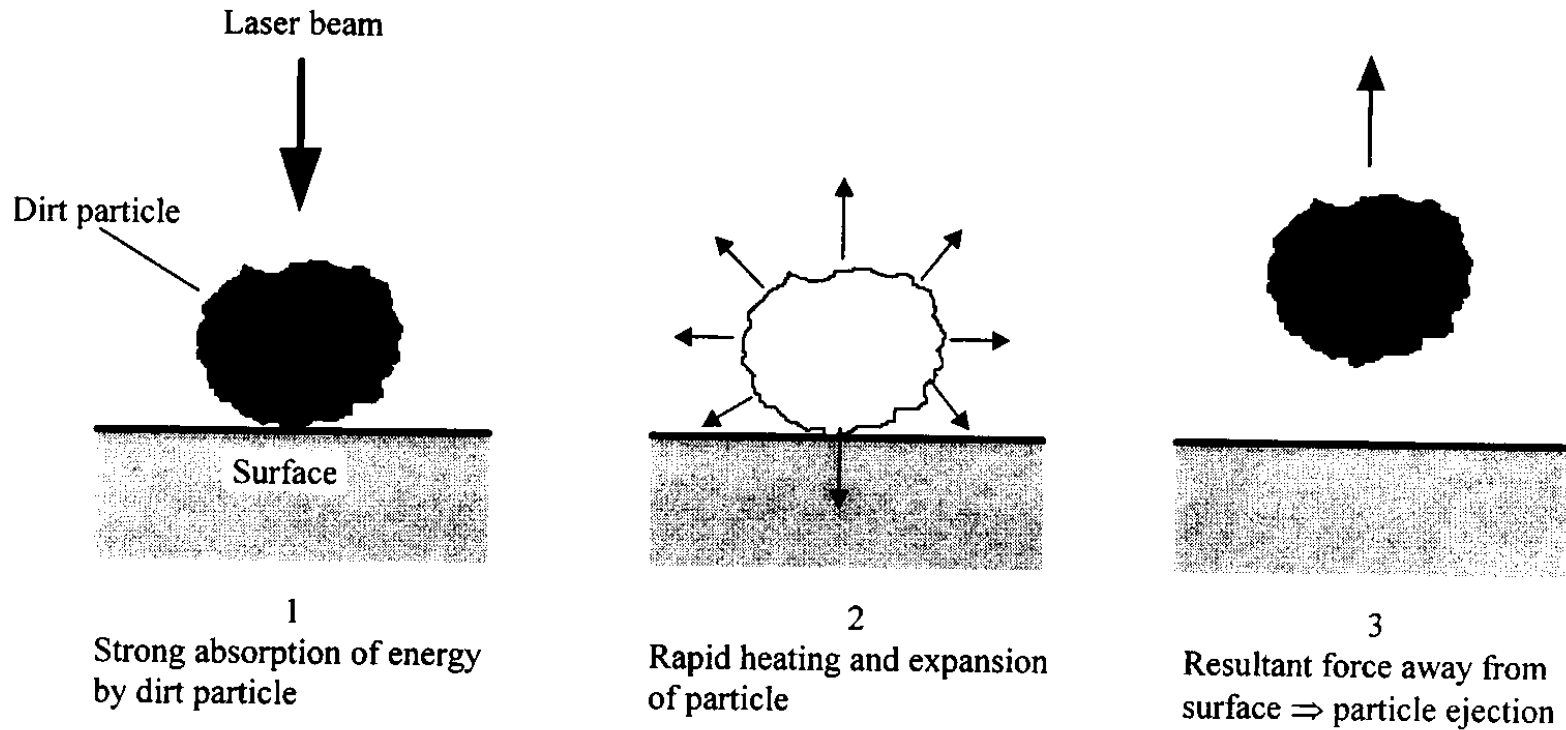


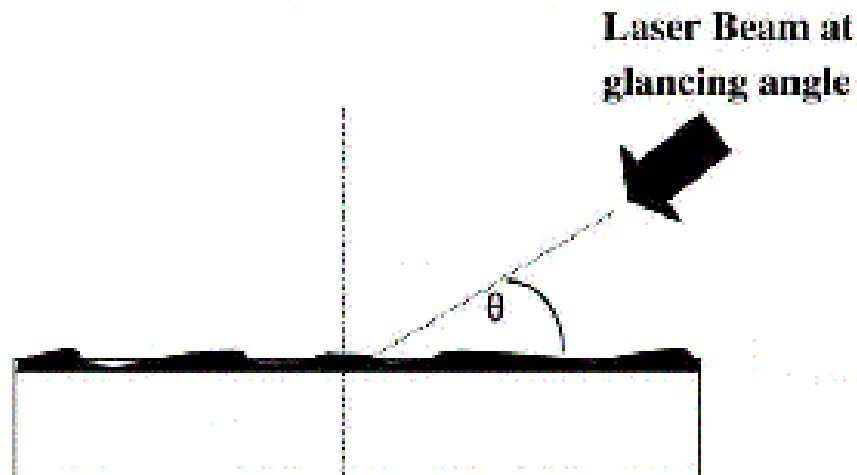
Figure 1.4. Removal of material by Q-switched laser radiation (Asmus, 1973).

Termická expanze částic



Removal of dirt particles by rapid thermal expansion.

Angulární čištění ($\alpha < 90^\circ$)



Efektivnější než klasicky používané kolmé uspořádání, největší absorptivita při Brewstrově úhlu.

Index lomu materiálu =
 $\tan(\text{Brewstrová úhlu})$.

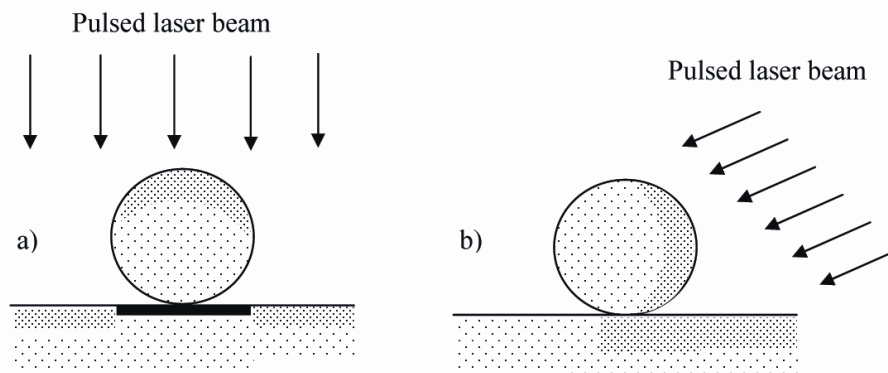


Fig. 3. Illustration of the laser absorption on the surfaces of the particle and the substrate for different laser incident angles (The density of "dots" indicates the amount of heating due to the laser absorption on the surfaces)

Čištění rázovou vlnou

Je účinná jen pro malé a silně vázané částice, pro čištění památek se nepoužívá.

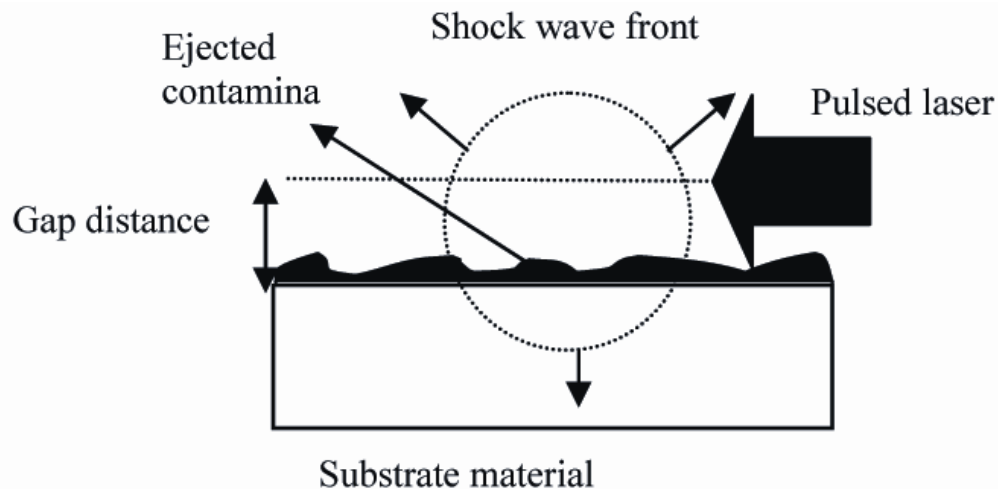


Fig 4: Schematic diagram of laser shock cleaning

Steam cleaning

= aplikace filmu kapaliny na povrch artefaktu

- Nečistoty jsou vázány pevně na povrch artefaktu a nelze je odstranit suchým čištěním.
- Povrch artefaktu je křehký a je tedy třeba použít menší hustotu energie.

Nejpoužívanější kapalinou je voda, možné je i použití organických rozpouštědel.

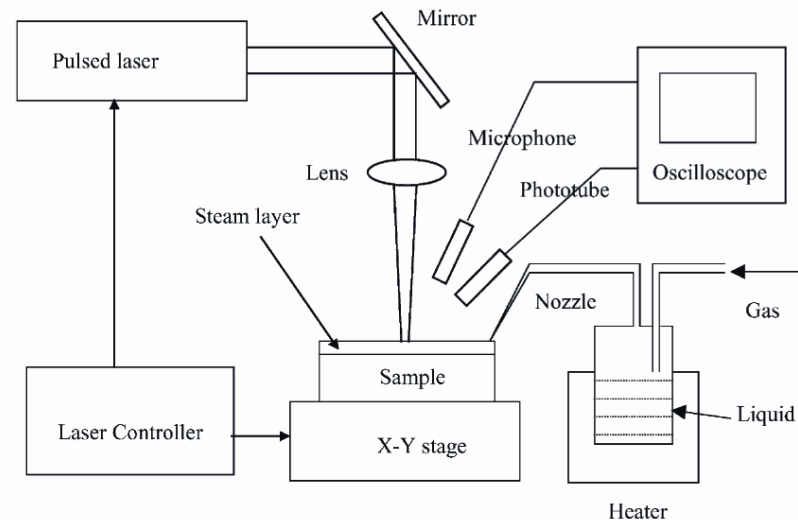
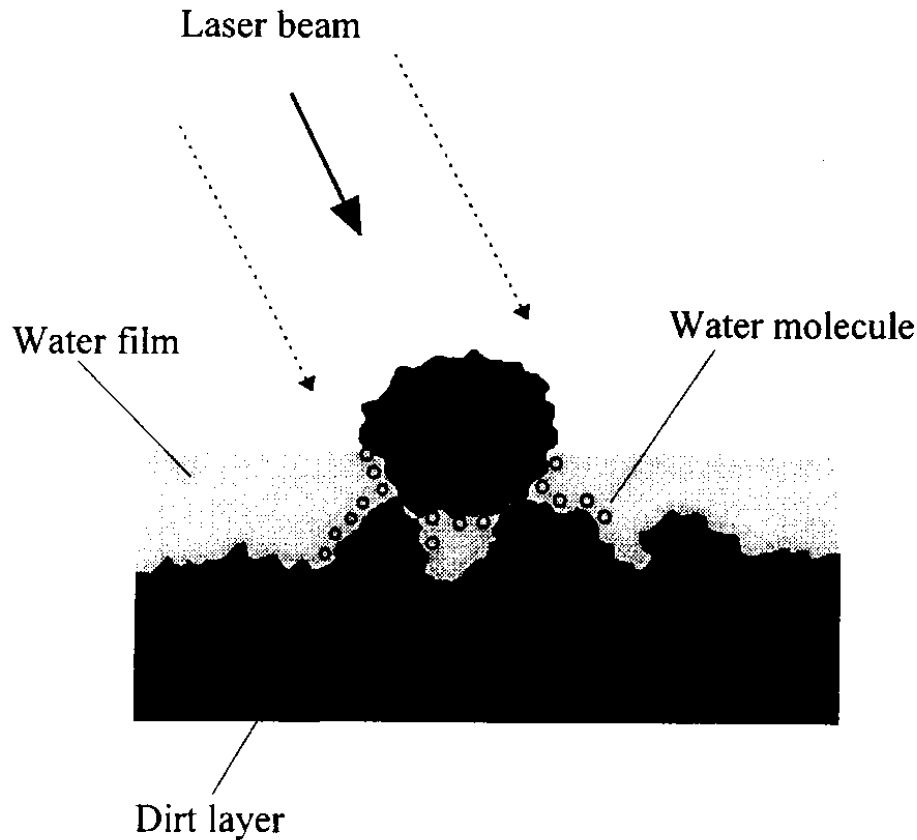


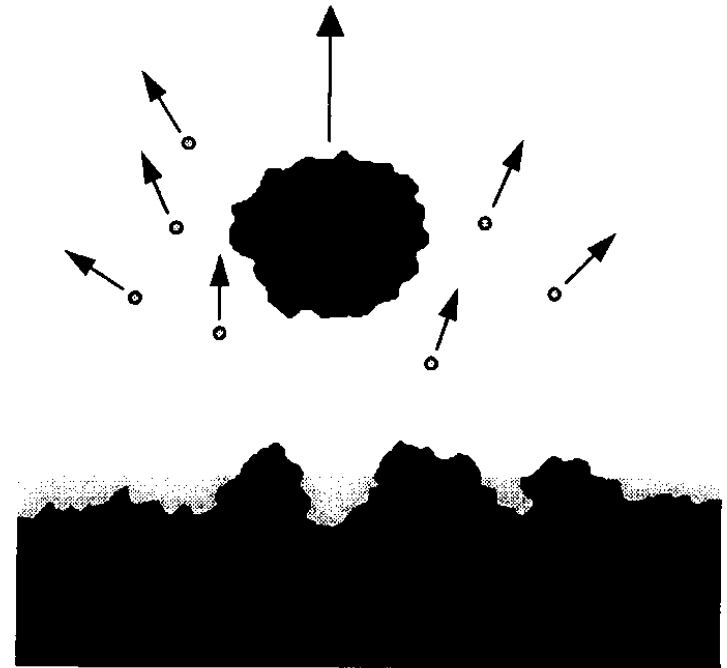
Fig. 1. Experimental set-up for steam-assisted laser ablation.

Kavitace – další možný mechanismus

Ablace v kapalině



Absorption of energy by dirt layer.
Rapid heating of water molecules at
water/dirt interface.



Explosive vaporization of water enhances
dirt removal from surface

Ablace koroze v kapalině (s vloženým napětím)

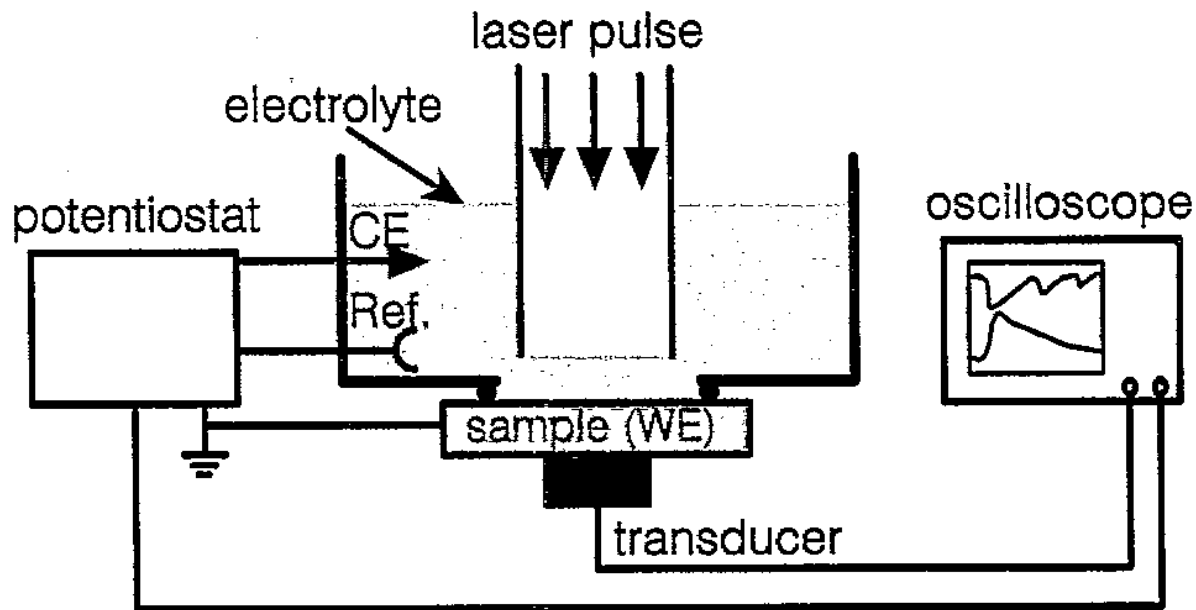


Fig. 1. Experimental configuration for the laser-induced oxide film removal in a liquid confinement at controlled electrochemical potential. Ref., reference electrode; CE, counter electrode; and WE, working electrode.

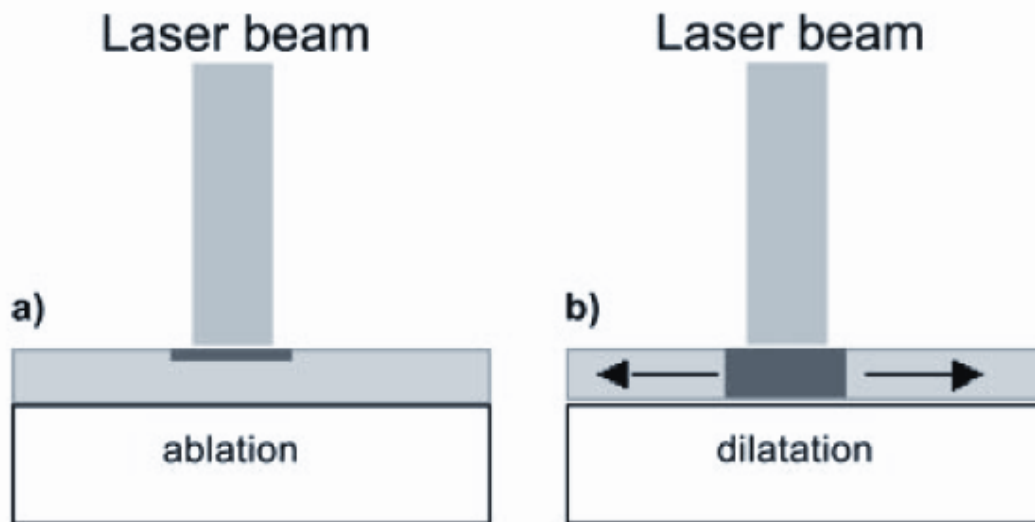


Fig. 4a,b. Schematic picture of the energy absorption in the Fe_3O_4 layer **a** before and **b** after electrochemical polarisation

Na železný předmět v borátovém pufru ($\text{pH} = 10$) v tříelektrodovém uspořádání (předmět = katoda) se vloží kontrolovaný potenciál (-2 V). Vodík vznikající katodickou redukcí se zachycuje na oxidové vrstvě. Laserový puls (Nd:YAG 1064 nm) způsobí rozpínání vodíku a mechanickou destrukci korozní vrstvy. Monitorování průběhu čištění se provádí např. cyklickou voltametrií.

Aplikace laserů pro likvidaci mikroorganismů

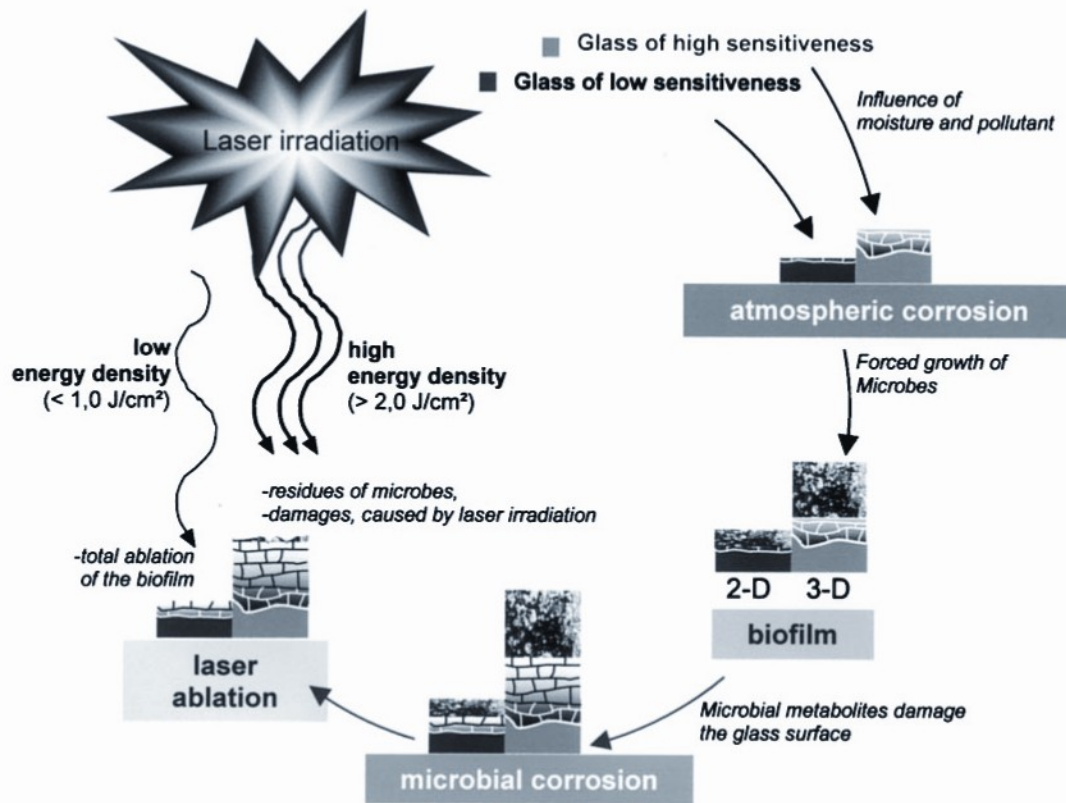


Figure 10. Interaction of glass and biofilm and the synergetic effect of glass composition, abiotic corrosion, biogenic corrosion and growth of biofilm, factors which influence the effectiveness of the laser cleaning.

- Bakterie
- Plísně
- Lišejníky

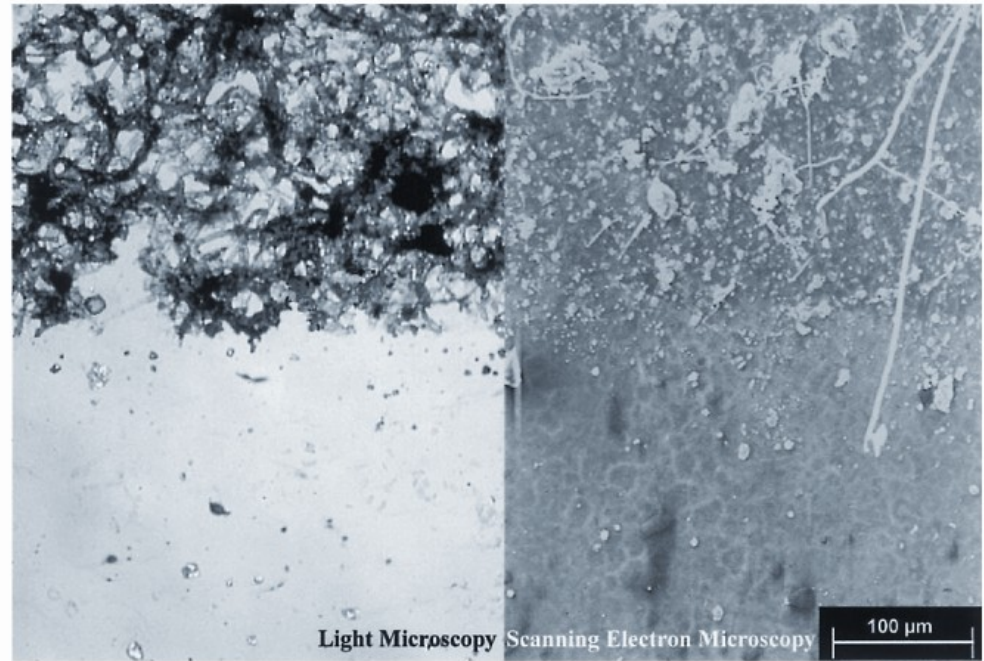
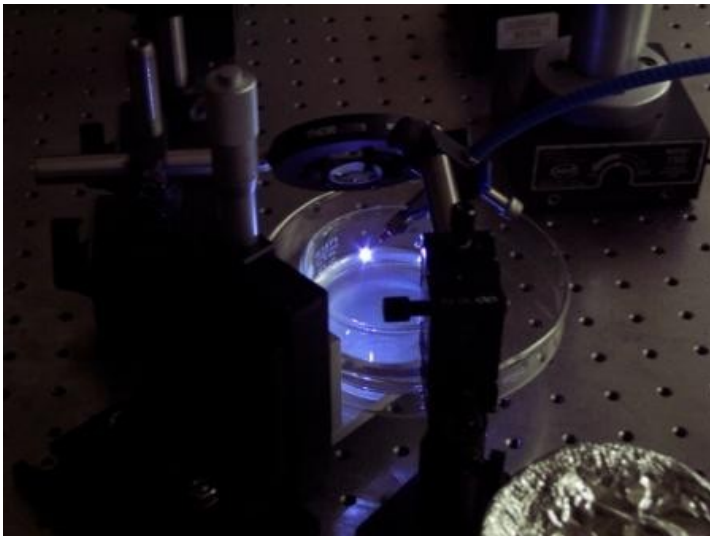


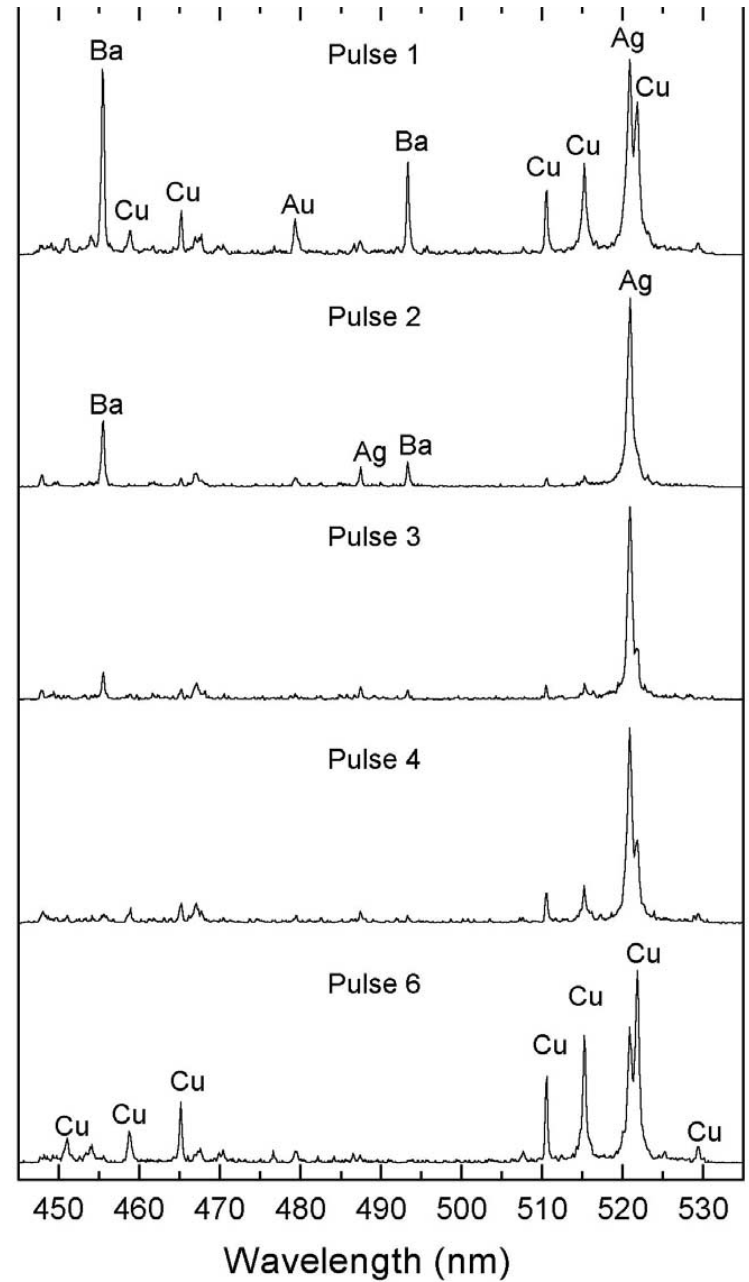
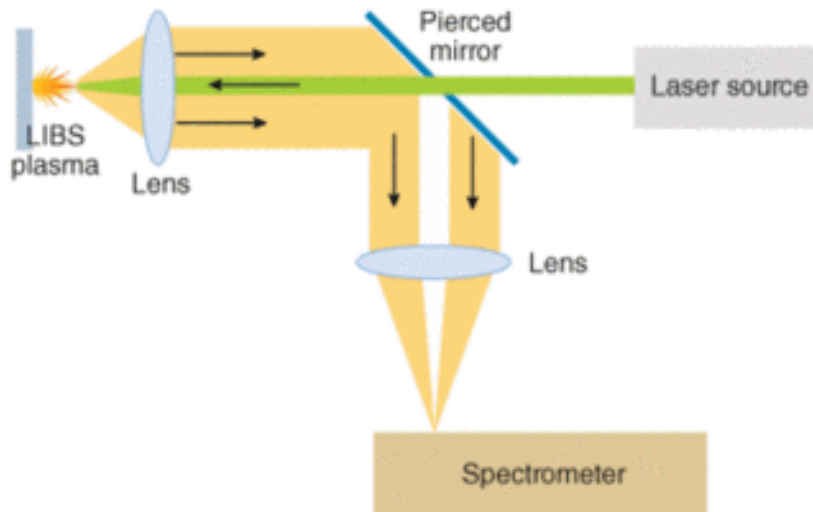
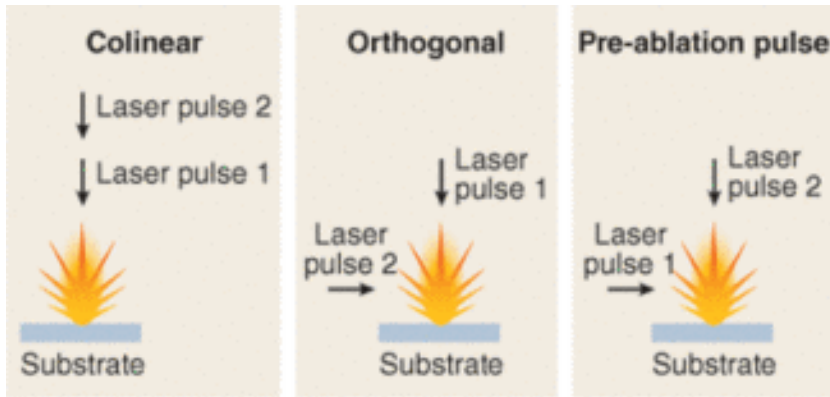
Figure 2. The laser cleaning of two-dimensional biofilms is successful with an energy density of 1.0 J/cm^2 .



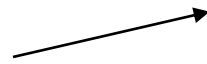
Monitorování procesu laserového čištění



LIBS

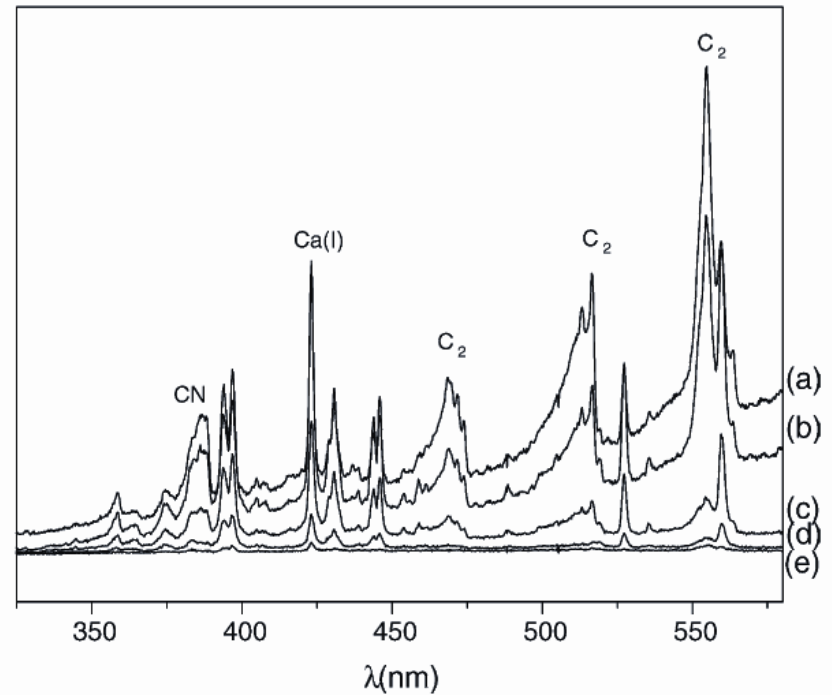


Daguerrotypie, 19. stol.



LIBS

Molekulové pásy



Spojení s Ramanovou spektrometrií

Fig. 6. Evolution of LIBS spectrum with the number of pulses during the removal of black paint on wood: (a) pulse 1, (b) pulse 2, (c) pulse 4, (d) pulse 7 and (e) pulse 9. Irradiation wavelength: 308 nm.

Měření na dané čáře v UV-VIS

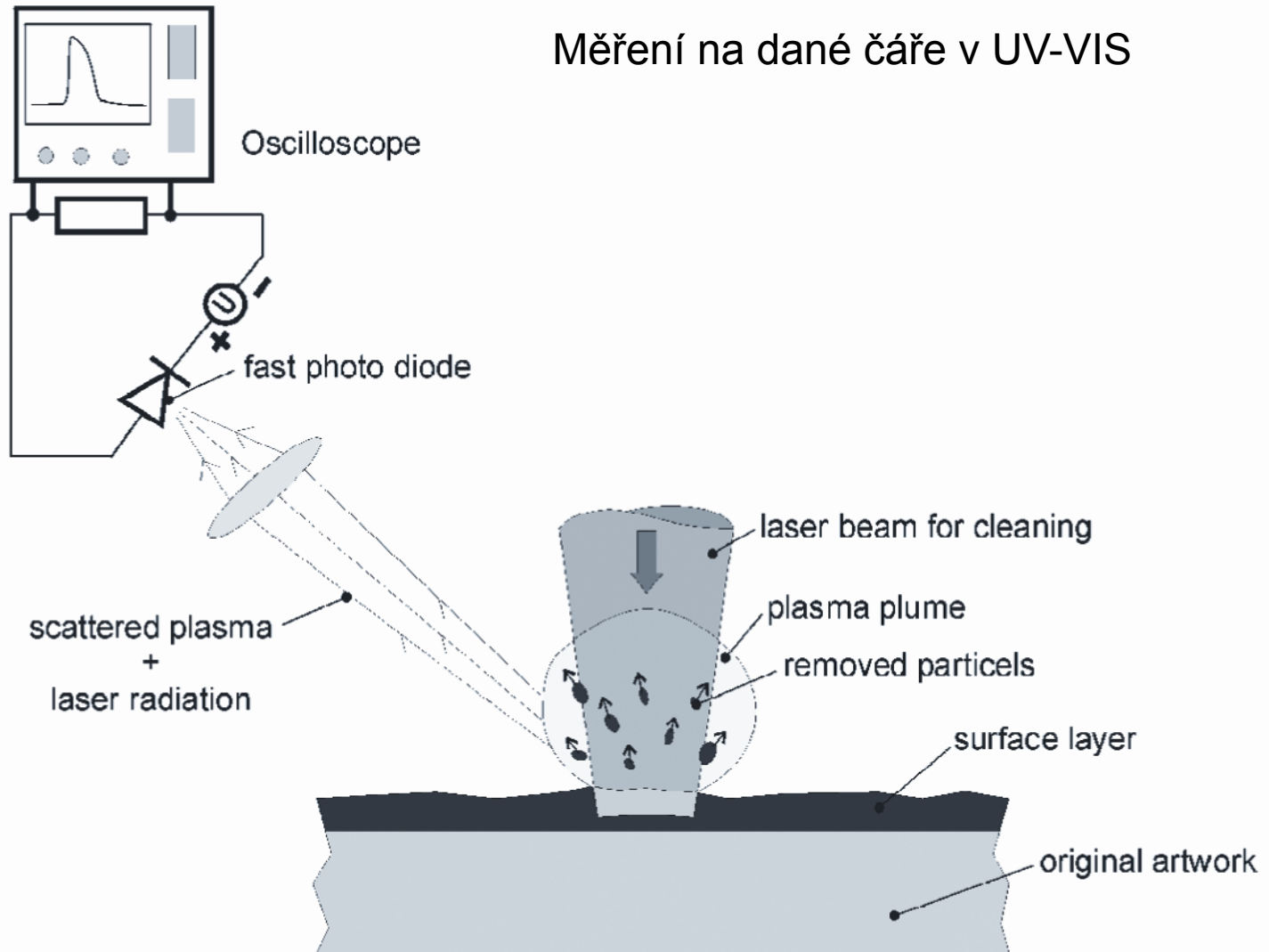


Fig. 1. Experimental set-up for detection of the scattered radiation during laser cleaning.

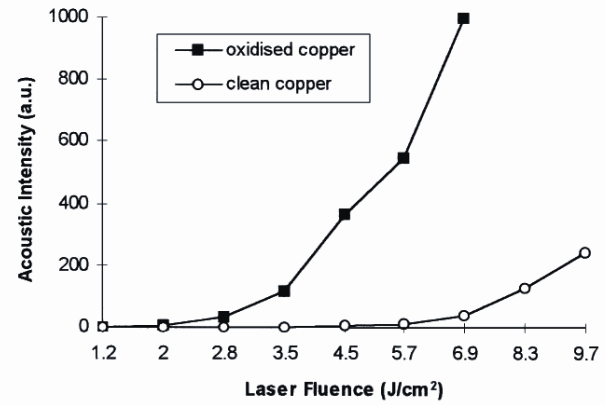
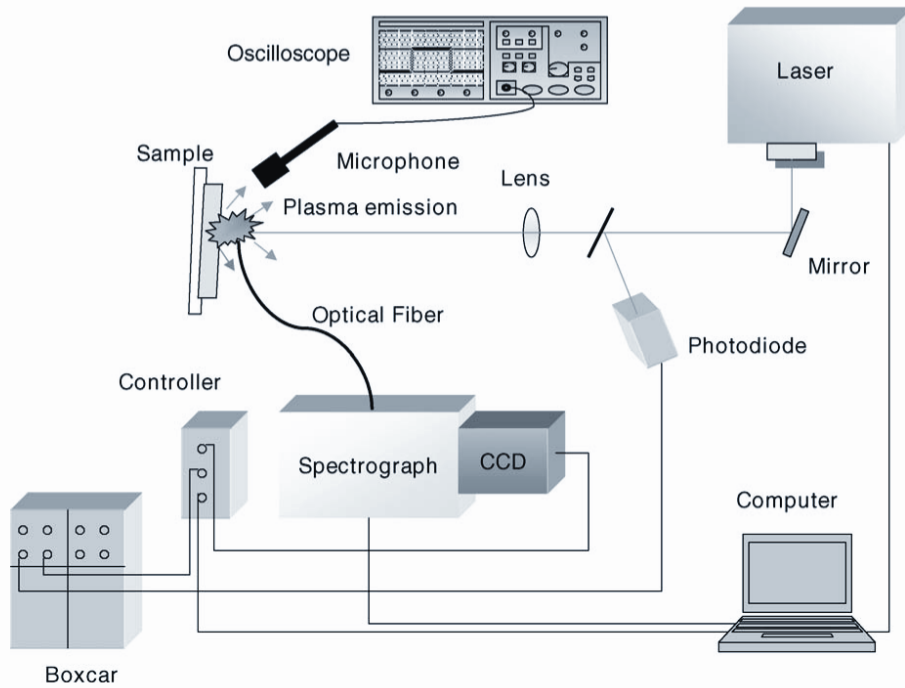


Fig. 3. Acoustic emission intensity as a function of laser fluence in the laser treatment of an oxidised copper surface and a clean copper surface.



Schematic diagram of the experimental set-up used for the LIBS experiments and for the photoacoustic measurements.

Sledování akustického projevu

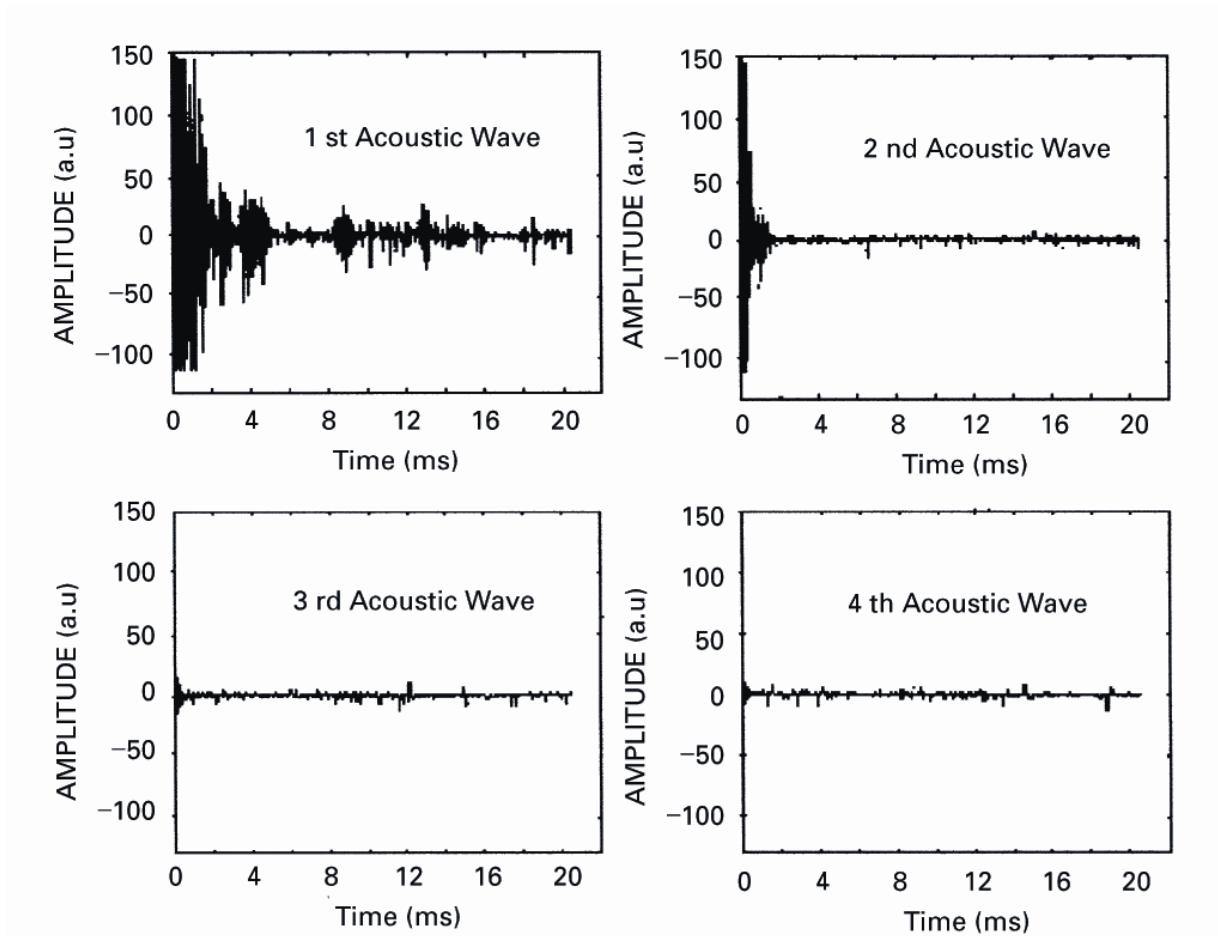


Fig. 2. Acoustic waves emitted from an oxidised copper substrate under laser irradiation from the first to the fourth pulse, respectively.

Zařízení na laserové čištění uměleckých artefaktů

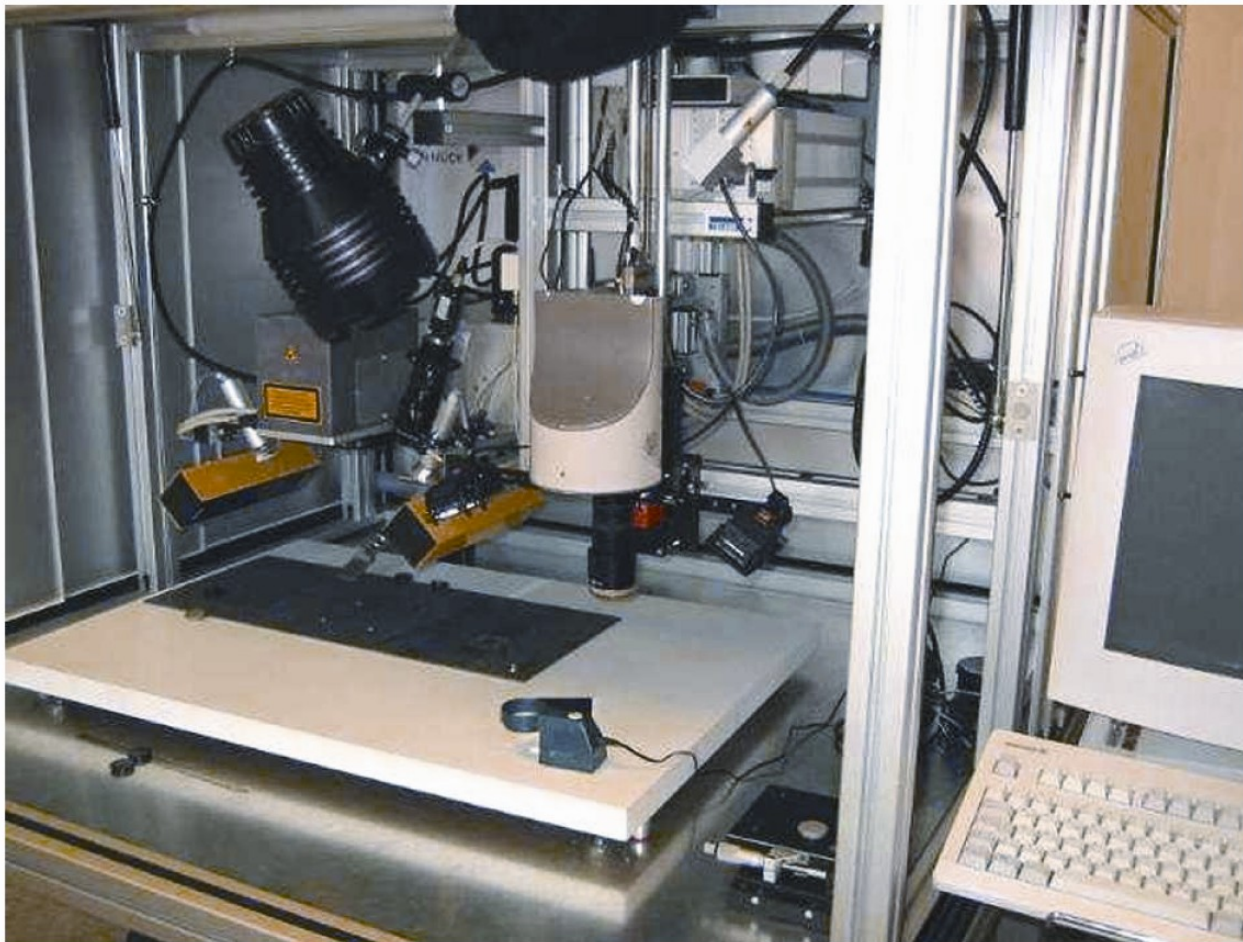


Figure 6.

The laser system developed for the cleaning of paper and parchment is organised in a closed box, providing maximum safety of operation. The set-up includes besides the laser imaging systems and a positioning table.

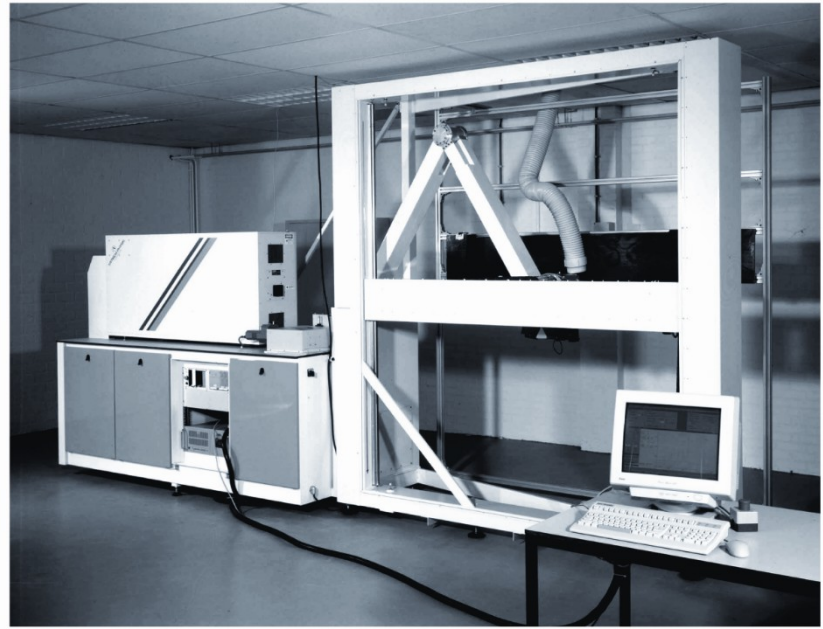


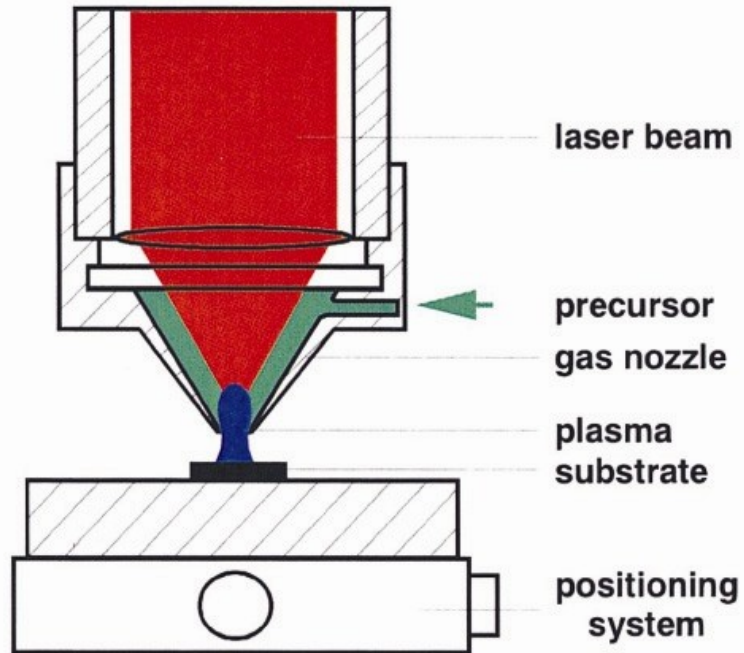


Plate 4.1. Laser cleaning of sculptural detail on the outside of a building.



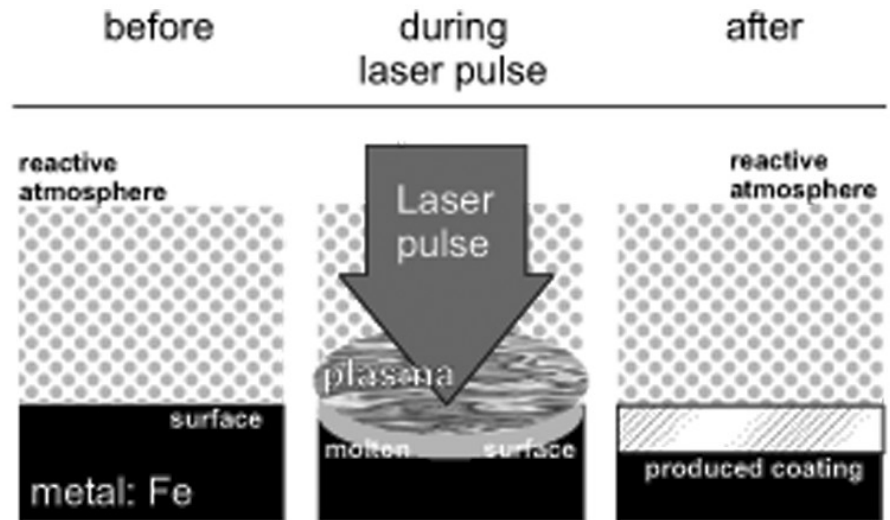
Povrchové úpravy

Nitridace a karburizace povrchu



Nitridace (N_2)

Karburizace (CH_4)



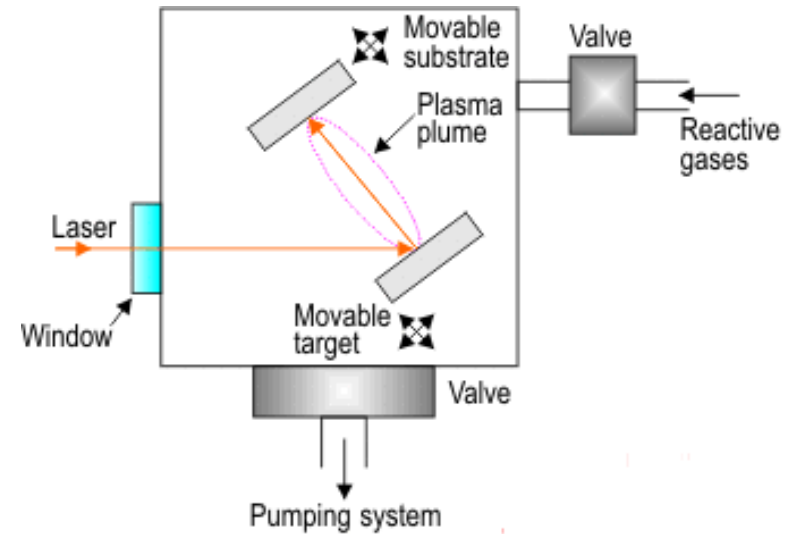
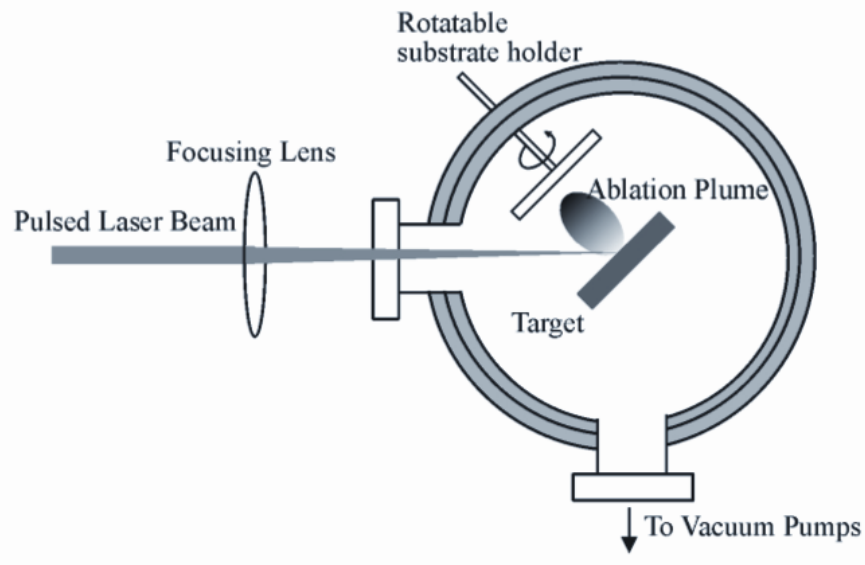
Snaha zabránit korozi železa.

Naprašování povrchových vrstev

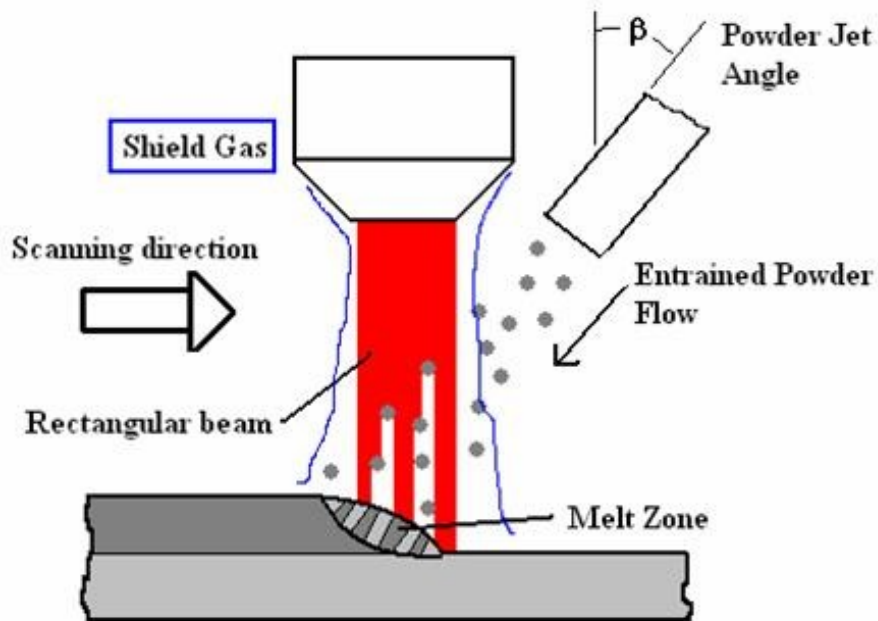
Kovy

Polovodiče

Polymery

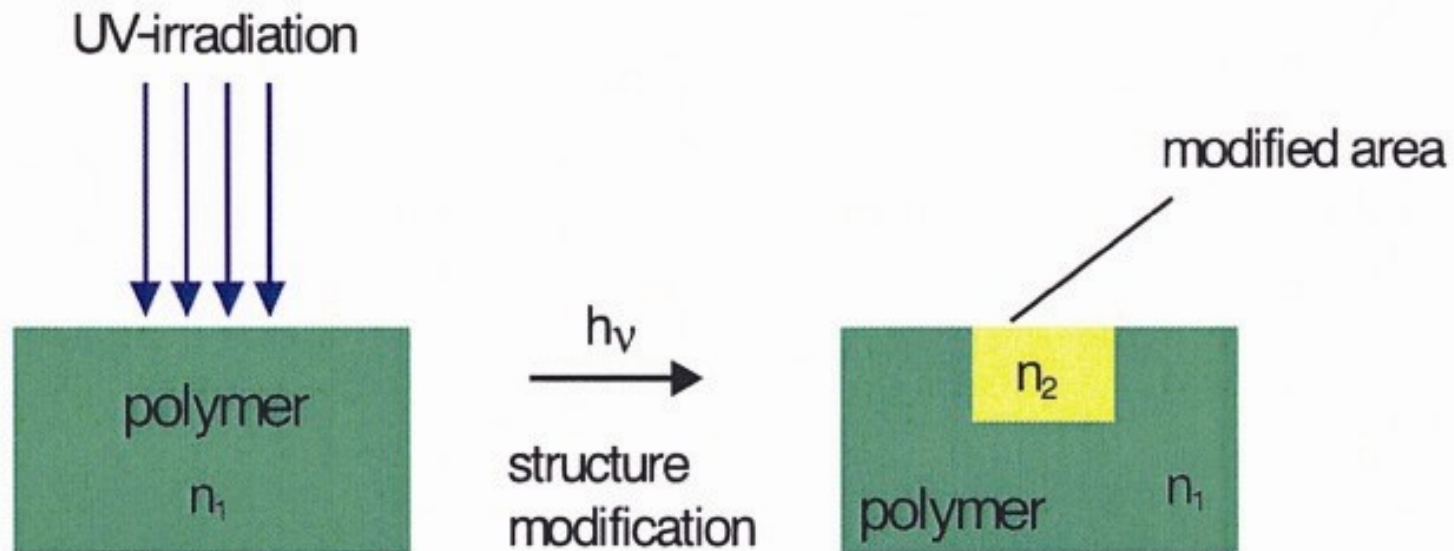


Natařování povrřových vrřteř



Změny fyzikálních vlastností

Změna indexu lomu polymeru



Změny fyzikálních vlastností

Vytrvzování polymerního materiálu působením UV laseru

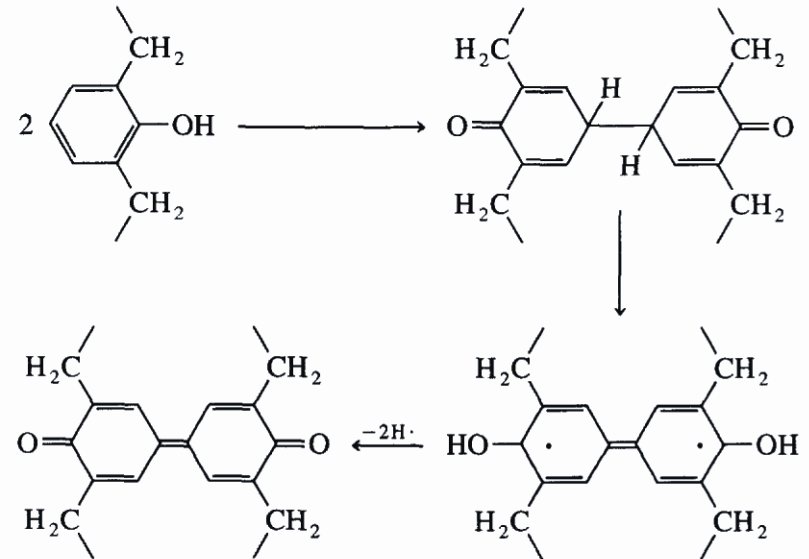
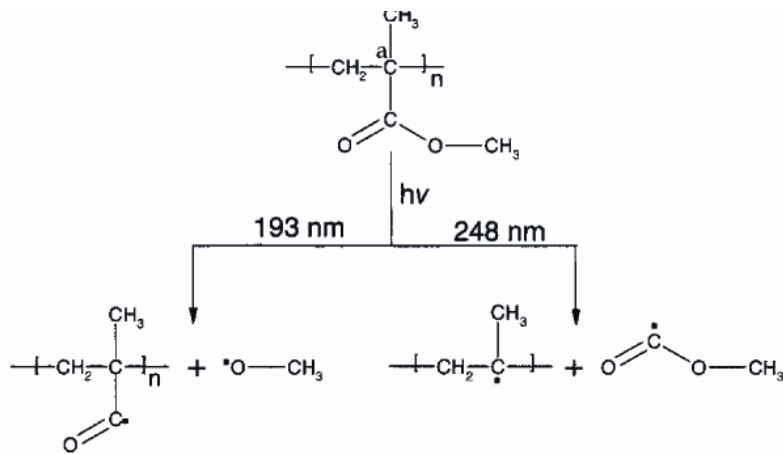
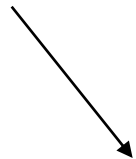


Fig. 11. Simplified photochemical modification scheme of irradiated PMMA.

Změny fyzikálních vlastností

Přechod sol-gel

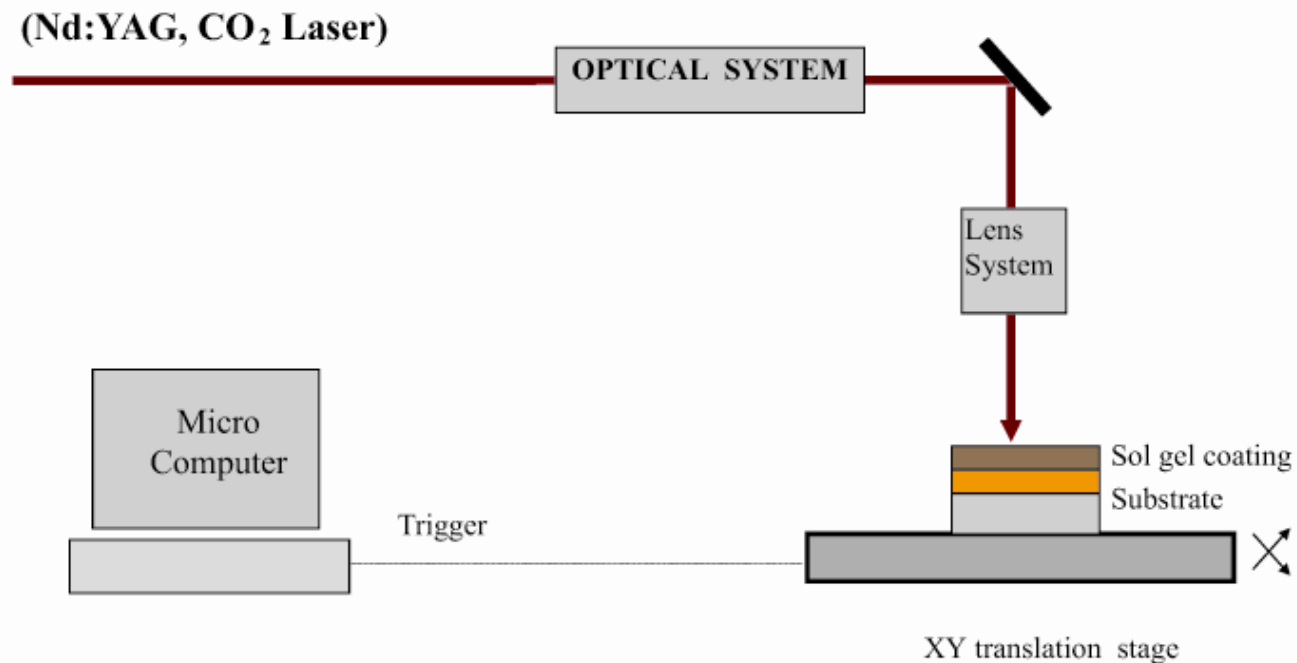
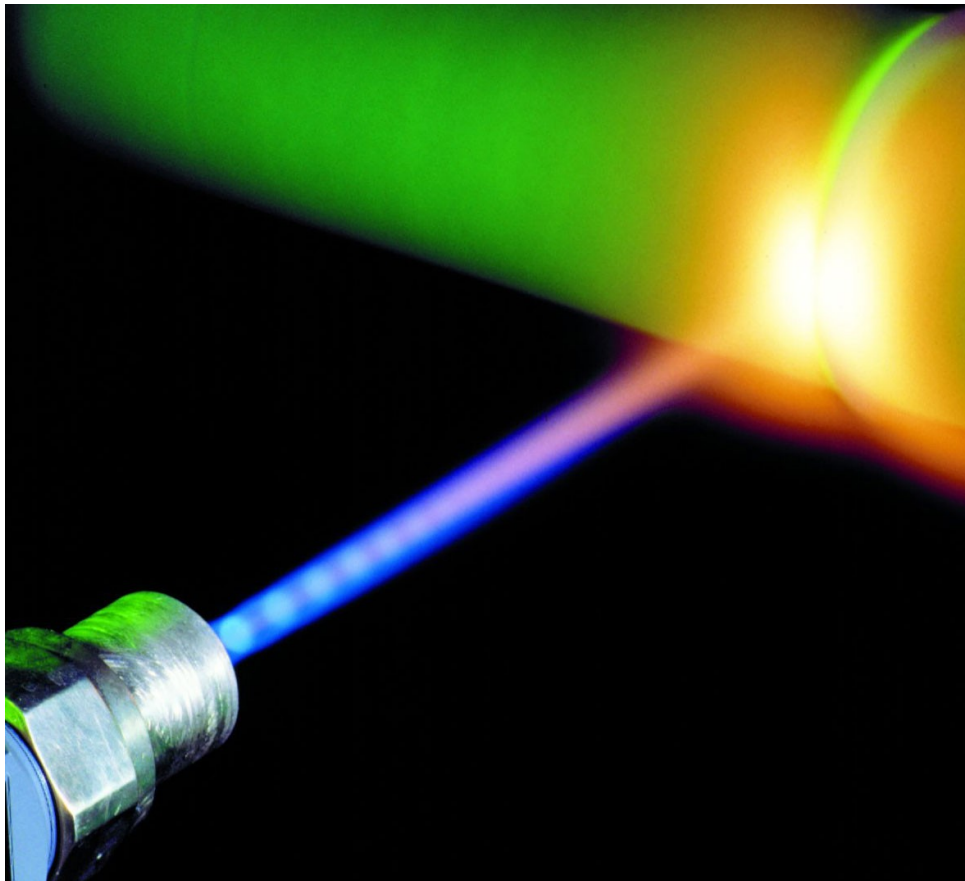


Fig. 1. Experimental setup of the process

Obrábění laserovým paprskem



Řezání

Vrtání

Rytí a leptání

Sváření

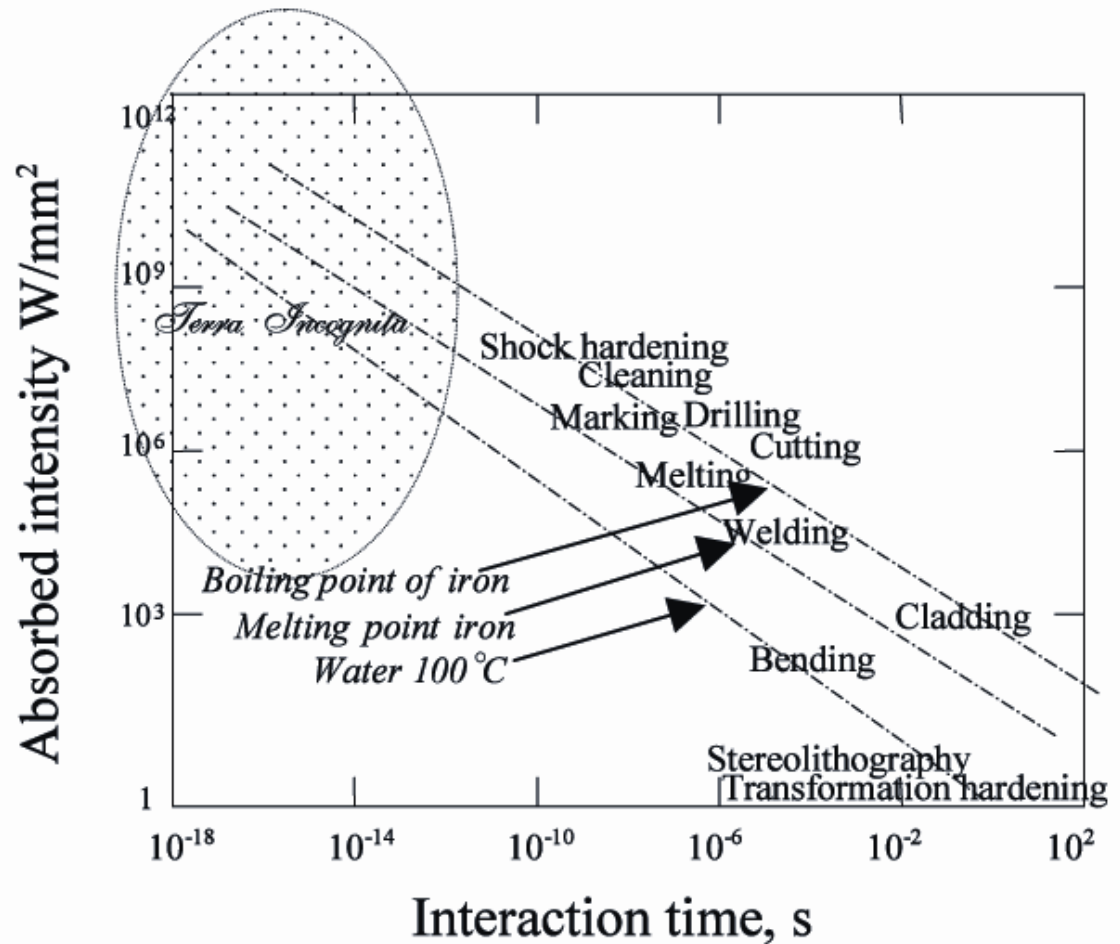
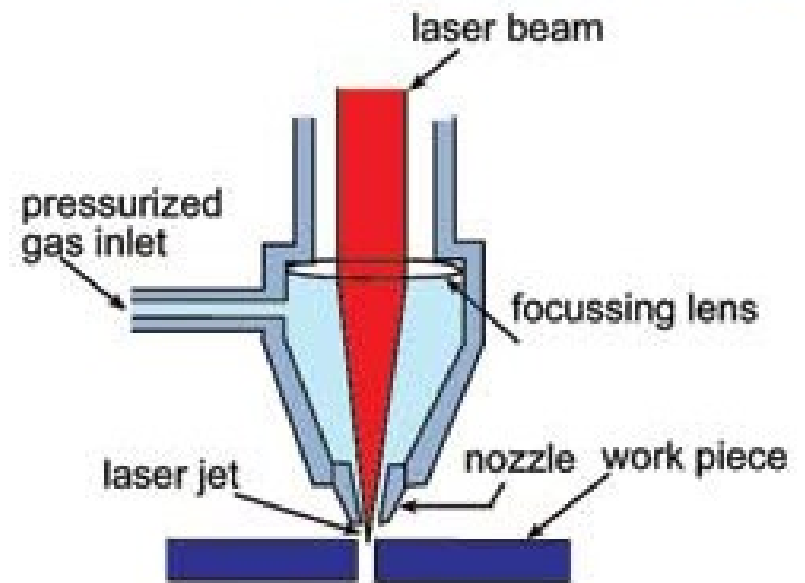
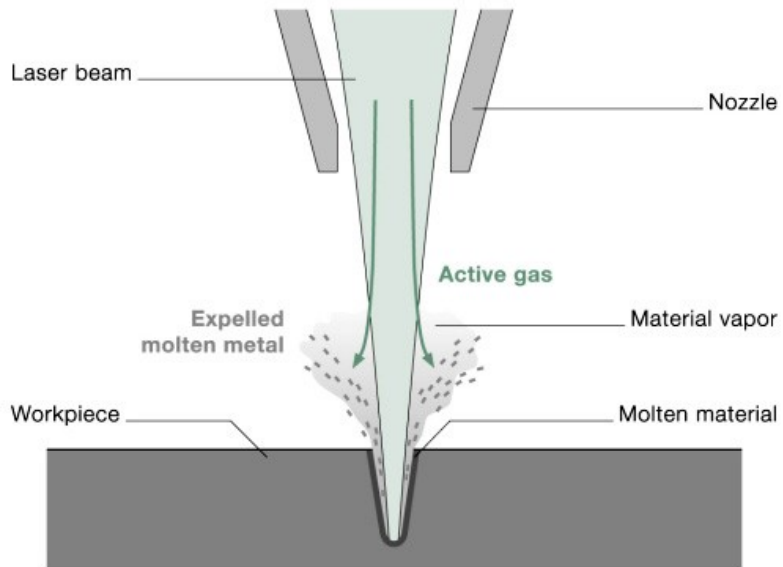


Figure 1. The range of processes.

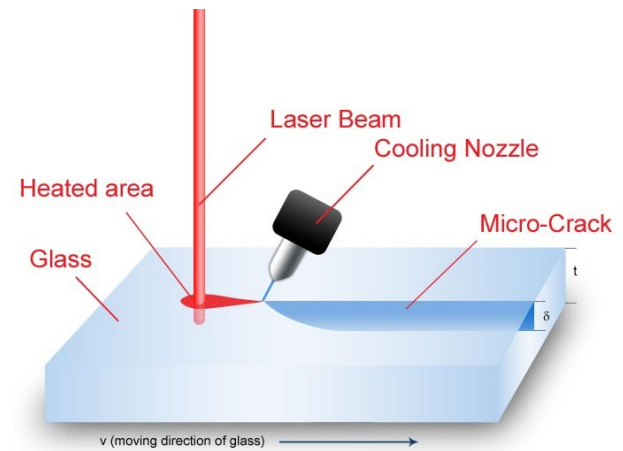
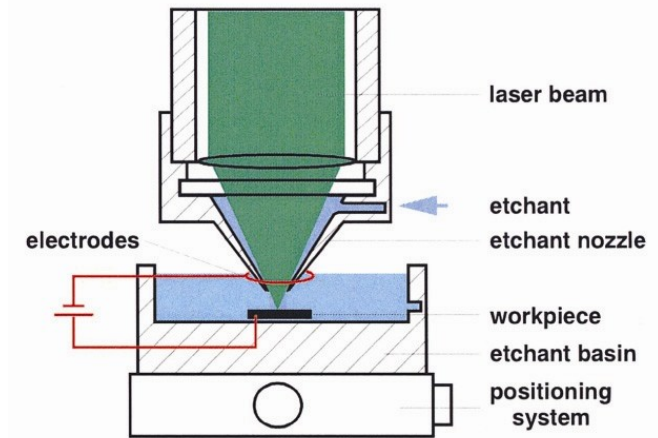
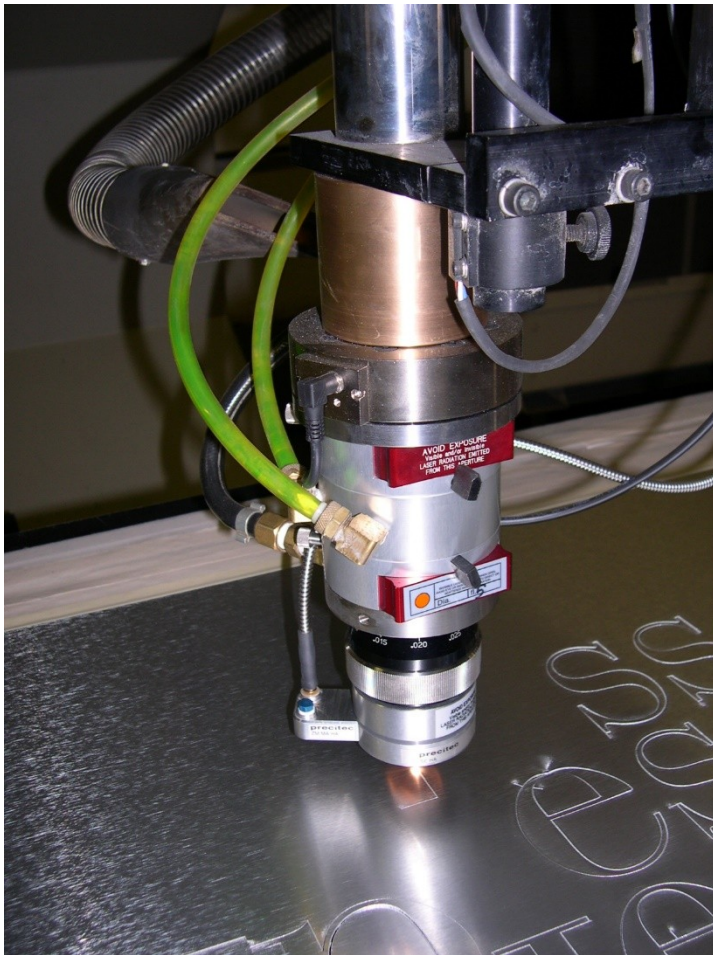
Řezání laserovým paprskem



Vrtání laserem



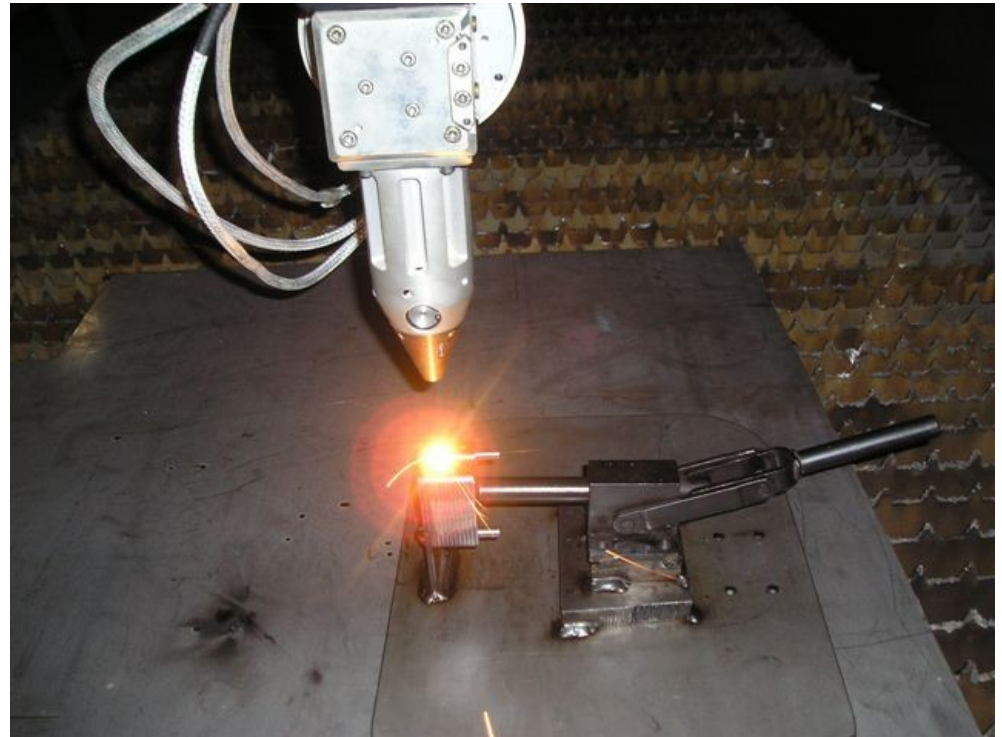
Rytí a leptání



Sváření laserovým paprskem (laser welding)

Svařování různorodých materiálů

Navařování malých součástek

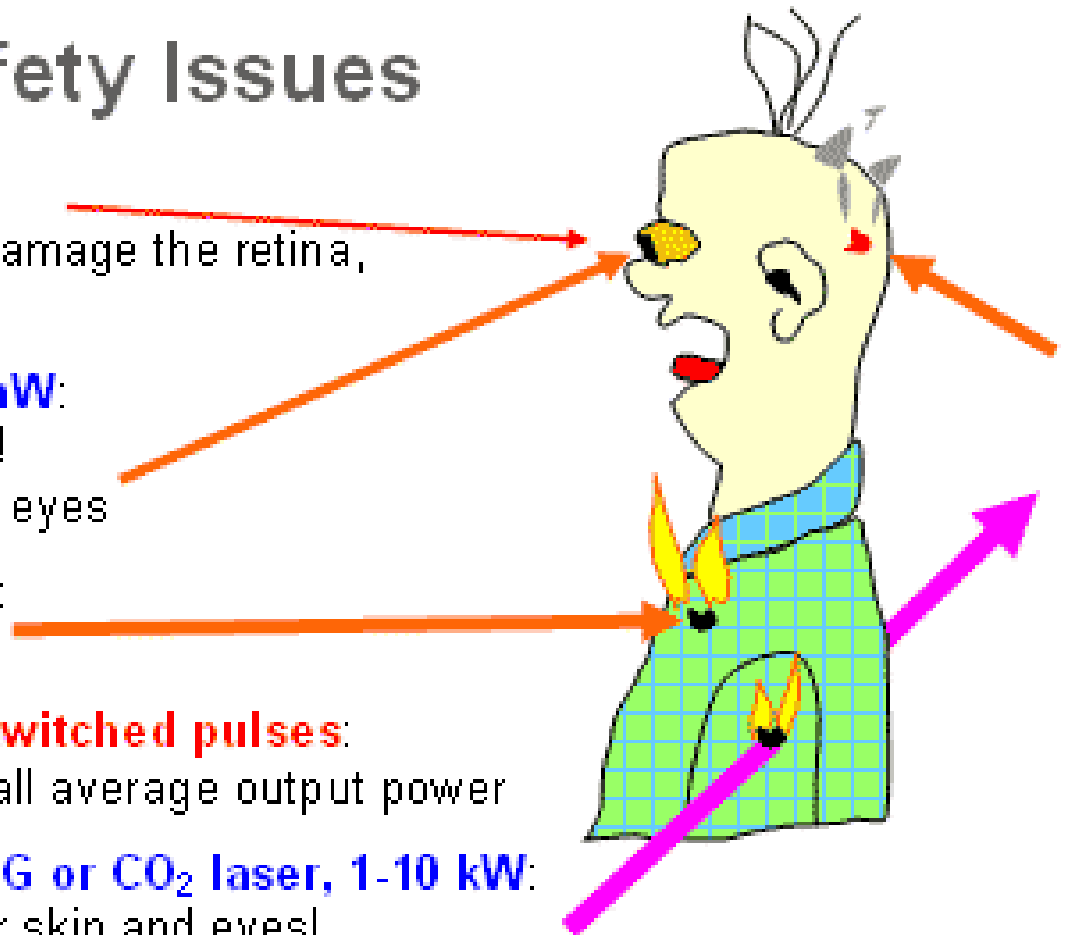


Bezpečnost práce s lasery

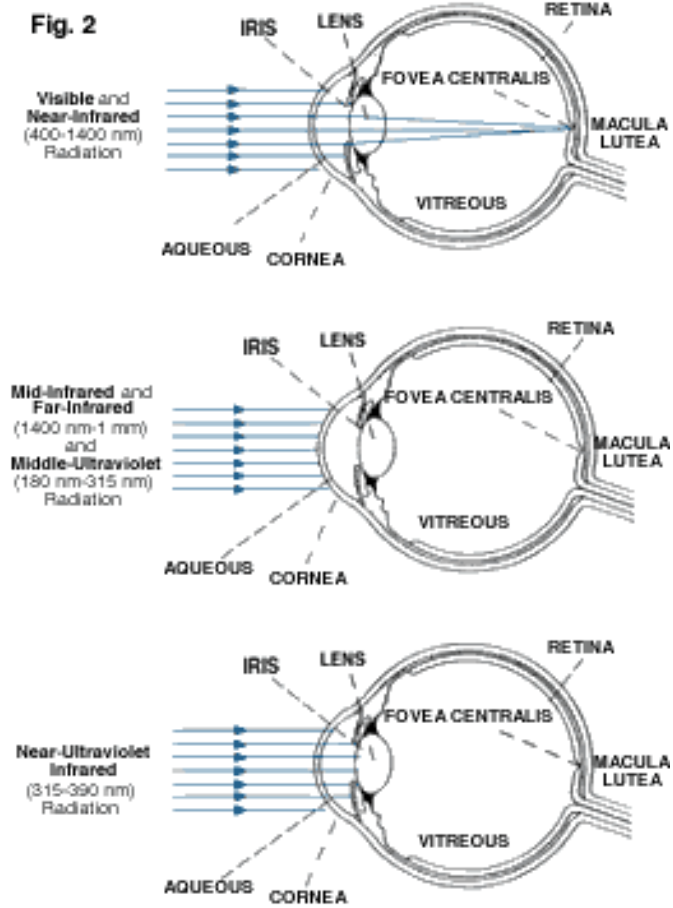
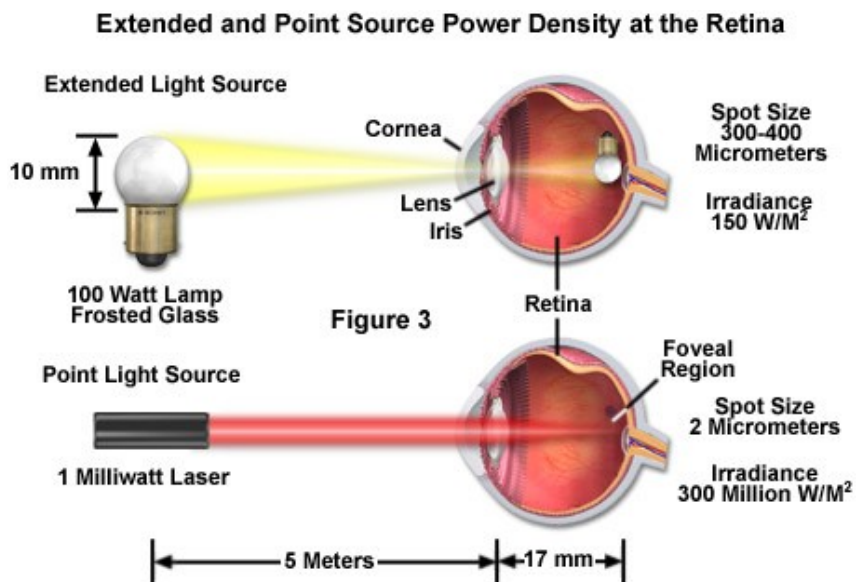


Laser Safety Issues

- **Laser pointer, 3 mW:**
rather bright; could quickly damage the retina,
but: blinking reflex helps
- **Small Nd:YAG laser, 100 mW:**
invisible – no blinking reflex!
⇒ rather dangerous for the eyes
- Larger **Nd:YAG laser, 10 W:**
burns skin and clothes
- Small **Nd:YAG laser** für **Q-switched pulses:**
very hazardous even for small average output power
- Industrial high power **Nd:YAG or CO₂ laser, 1-10 kW:**
for welding; not beneficial for skin and eyes!



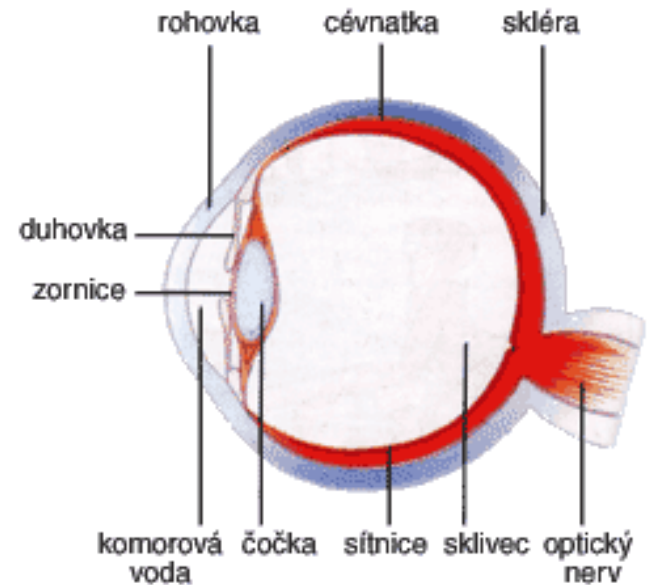
Pokud laser pracuje na určitých vlnových délkách, na které je schopno se oko soustředit a které mohou být dobře soustředěny sítnicí a rohovkou oka, tak vysoká koherence a malý rozptyl laserového paprsku může u některých typů laserů způsobit, že je přijímaný paprsek soustředěn pouze do extrémně malého bodu na sítnici. To vede k bodovému přehřátí sítnice a k trvalému poškození zraku.



Poškození oka laserem

Vlnová délka

180–315 nm (UV-B, UV-C)	fotokeratitida (zánět rohovky)
315–400 nm (UV-A)	fotochemický zákal oční čočky
400–780 nm (visible)	fotochemické poškození sítnice
780–1400 nm (near-IR)	zákal, popálení sítnice
1.4–3.0 μm (IR)	Proteiny v komorovém moku, zákal, popálení sítnice
3.0 μm–1 mm	popálení sítnice



Bezpečnostní třídy laserů

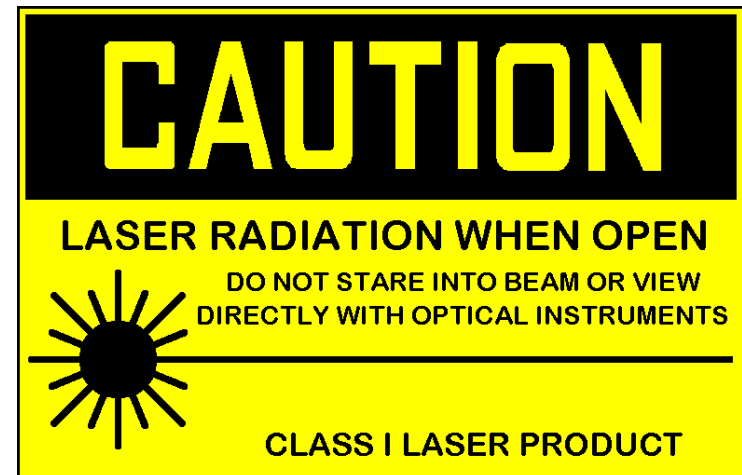
Třída I: viditelné záření, velmi malý výkon, nevyžadují bezpečnostní opatření.

Třída 1M: laser je bezpečný, kromě toho kdy paprsek prochází zvětšovací optikou (mikroskop, dalekohled).

Laserové tiskárny

CD-ROM

CD přehrávače



Bezpečnostní třídy laserů

Třída II:

kontinuální laser, viditelné záření, nízký výkon (méně než 1 mW)

přímý pohled do zdroje možný, oko ochrání mrkací reflex

Laserová ukazovátka

Geodetické lasery
(vyměřování)



Bezpečnostní třídy laserů

Třída IIIa:

kontinuální laser, střední výkon (1 mW až 5 mW), jinak totéž jako třída II

oko již může být poškozeno za pohledu do zdroje pomocí optické soustavy (např. dalekohled).

Laserová ukazovátka

Laserové skenery



Bezpečnostní třídy laserů

Třída IIIb:

IR a VIS lasery, střední výkon (cw: 5 - 500mW, pulsní 10 J/cm²)

nebezpečí poškození oka, nutno používat ochranné pomůcky (i při pozorování odrazu).

Spektrometrie

Stereolitografie

Laserové show



Bezpečnostní třídy laserů

Třída IV:

totéž jako třída III b), vysoký výkon střední výkon (cw: nad 500mW, pulsní nad 10 J/cm²)

Chirurgie

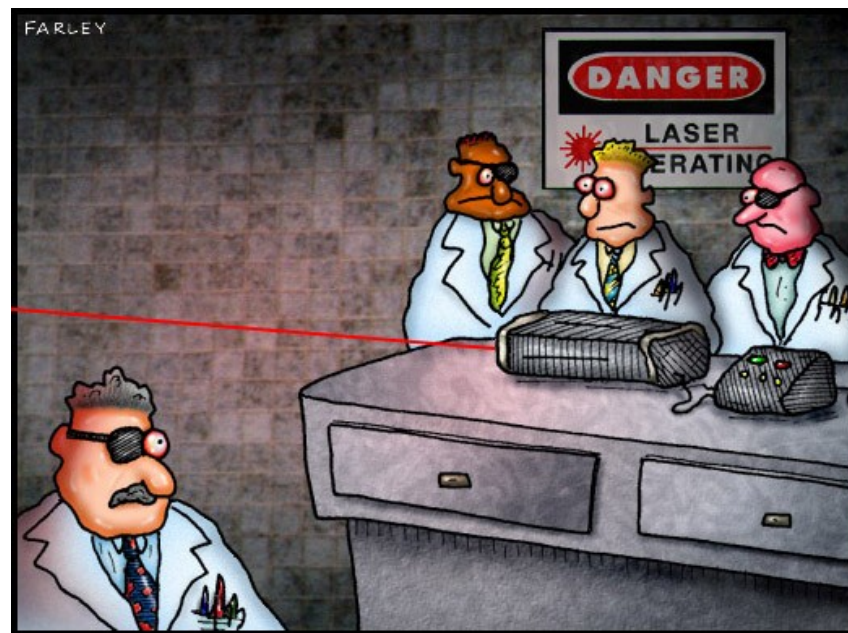
Obrábění

(řezání, sváření, vrtání, ...)



Běžně dostupné lasery bývají maximálně ve třídě III (optické soustavy cd přehrávačů)

Výkonné lasery (třídy IV) jsou schopné způsobit popáleniny, řezné nebo tržné rány; případně způsobit požár.



Nejen záření je nebezpečné

- Vysoké elektrické napětí (např. pro výbojky).
- Použití nebezpečných chemikálií.
- Potenciálně explodující nebo implodující skleněné trubice (např. obloukové lampy).
- Nebezpečí požáru.
- Výpary, prach, horké kapky roztaveného materiálu (např. při obrábění laserem).
- Sekundární záření (např. UV nebo RTG záření), vznikající interakcí laserového paprsku s materiálem.