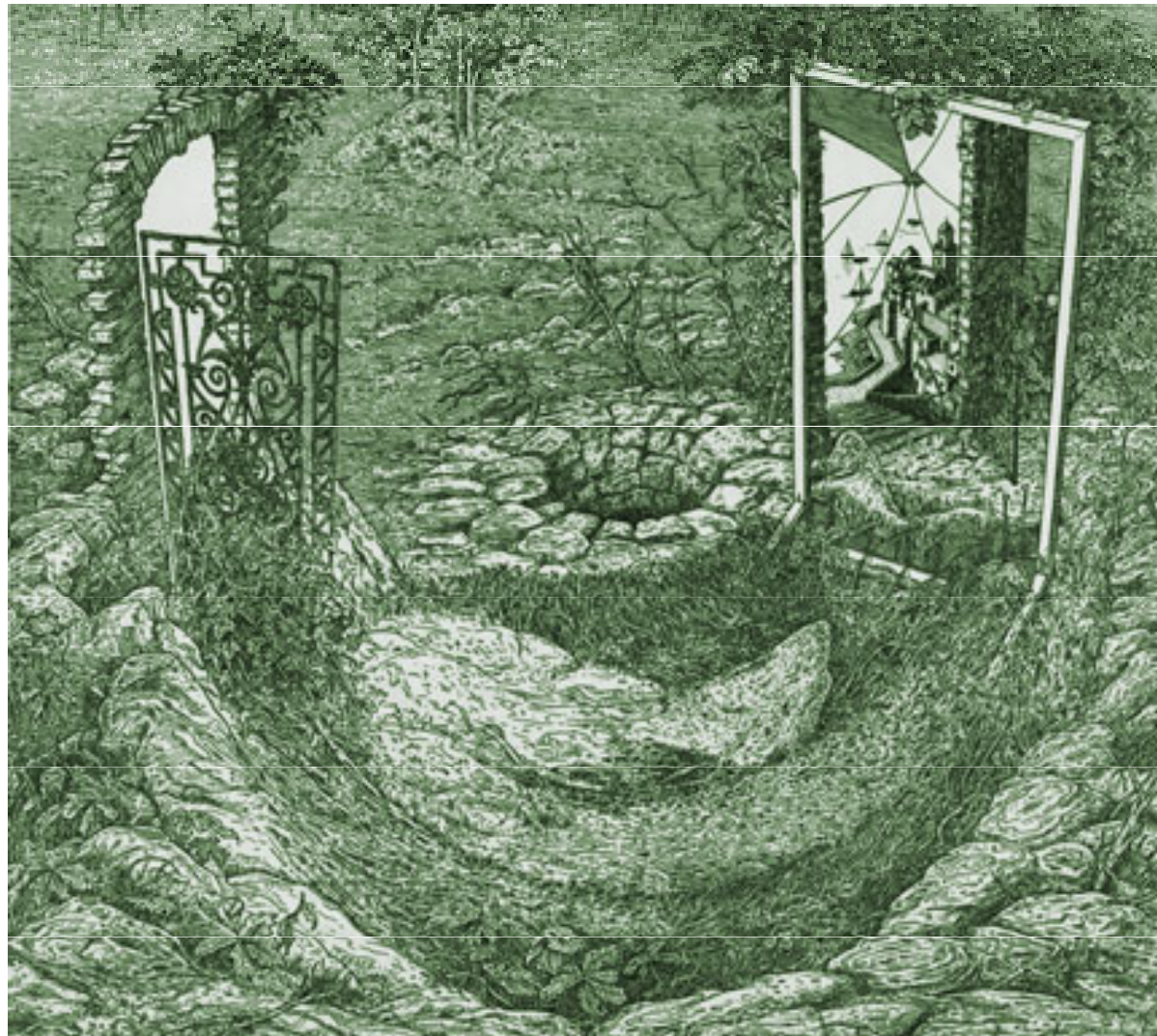


Odraz světla a umění



Jan Vermeer

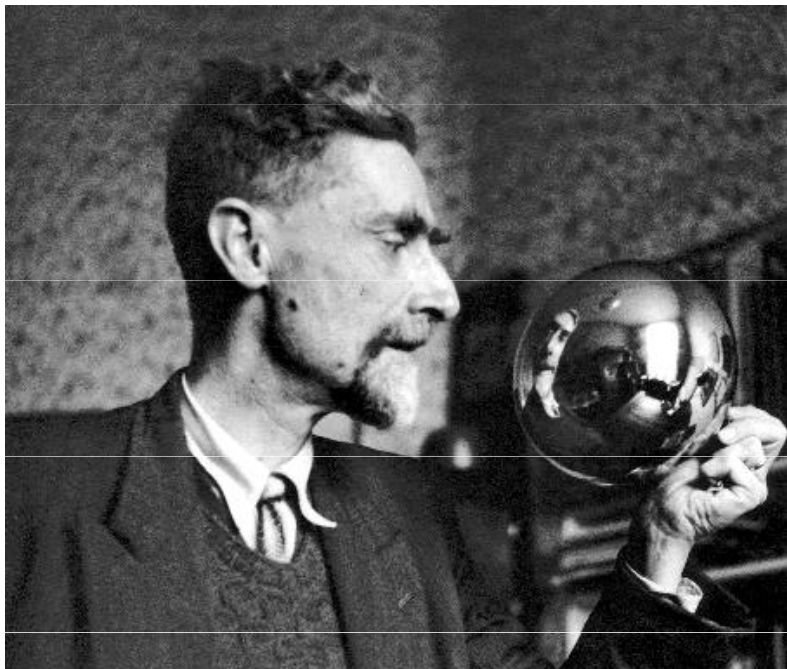
*Dívka čtoucí dopis u otevřeného
okna*

1657





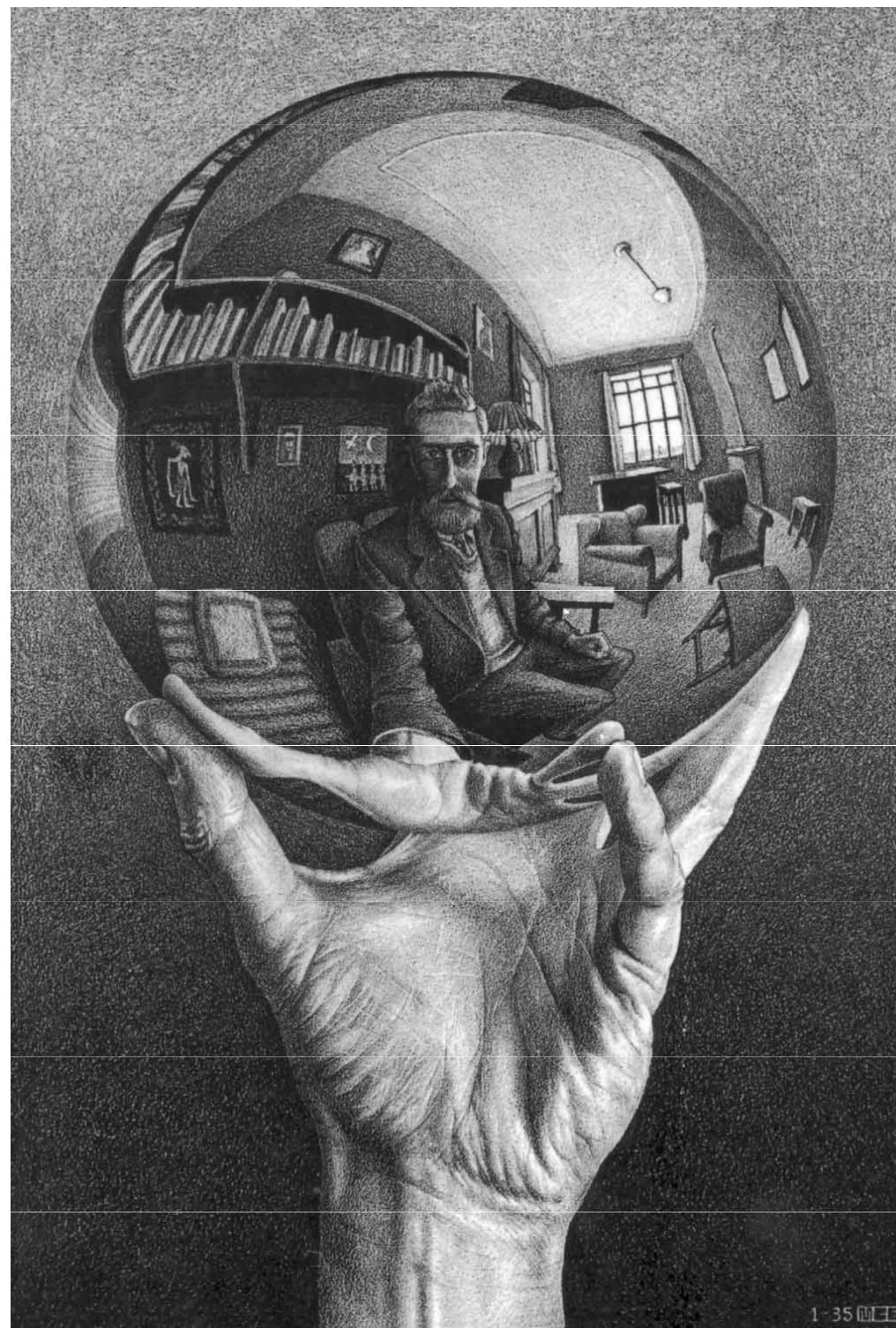
Edouard Manet *Bar ve Folies Bergère* 1882



Maurits Cornelis Escher

Ruka se zrcadlovou koulí

1935



Interakce laserů s materiálem

Vlastnosti materiálu

koeficienty odrazu (reflectivity), absorpce (absorptivity) a rozptylu (scattering) pro danou vlnovou délku

drsnost povrchu

tepelná vodivost a tepelná kapacita

Parametry laseru a záření

vlnová délka (energie fotonu)

délka pulsu

hustota výkonu

Absorpce a odraz záření

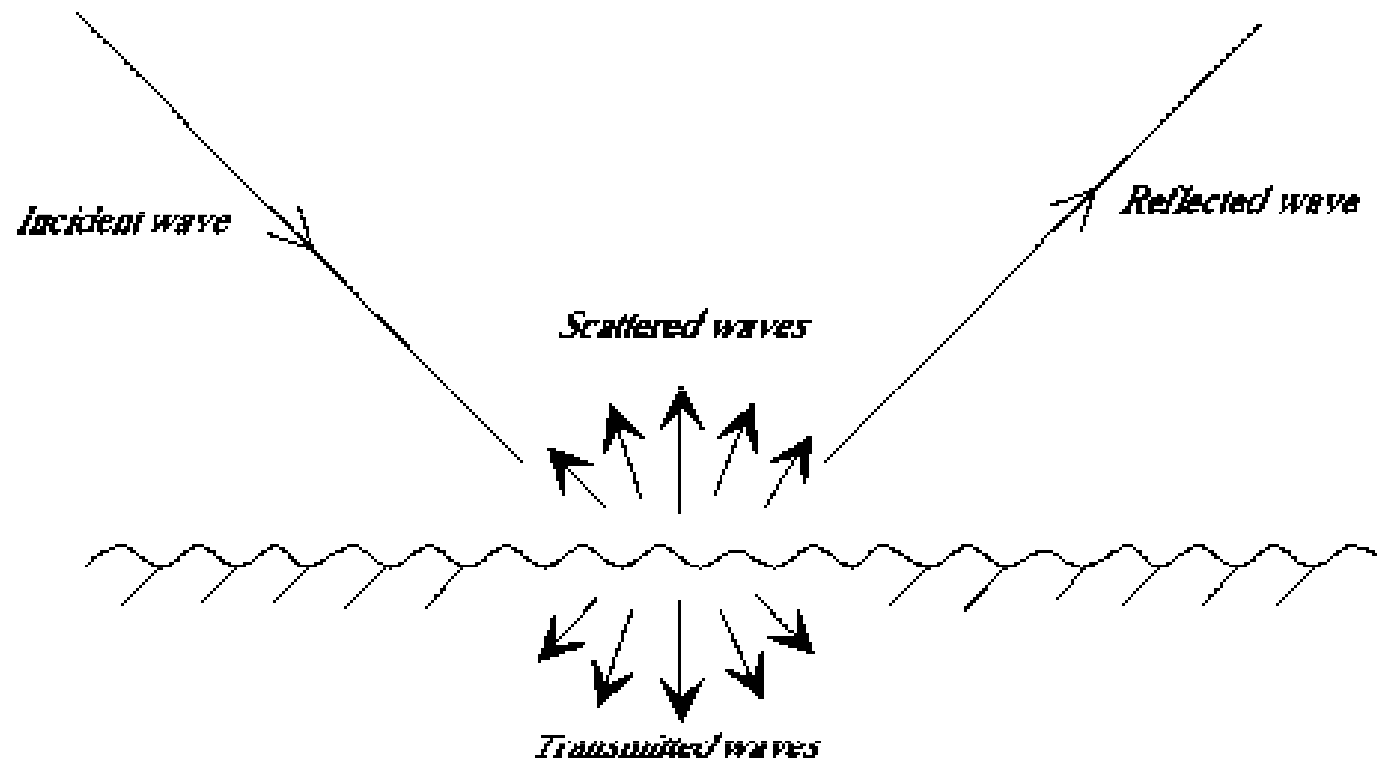


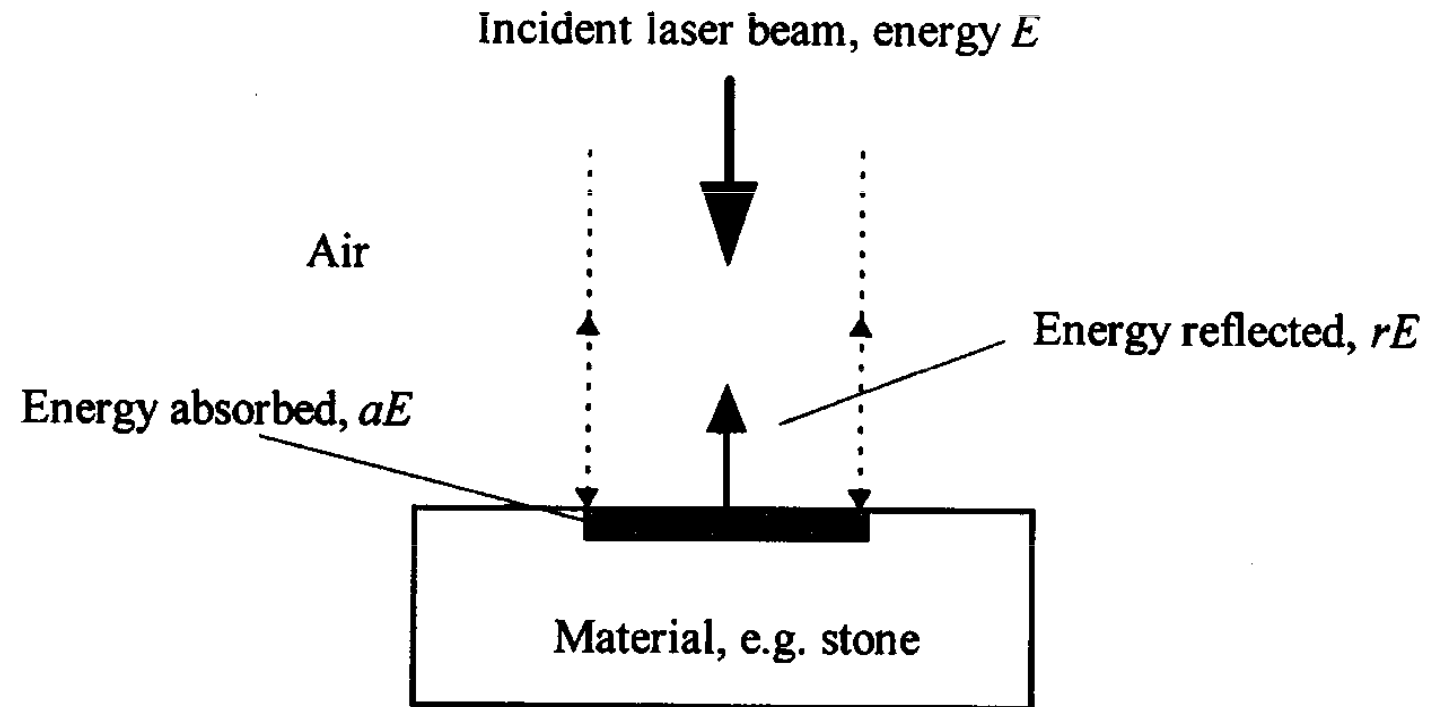
Figure 15. Case of natural environments: sum of specular reflection and diffuse reflection (volume reflection is ignored here).

Absorpce a odraz záření

absorpce volnými elektrony (kovy)

vázanými elektrony (polovodiče) = excitace

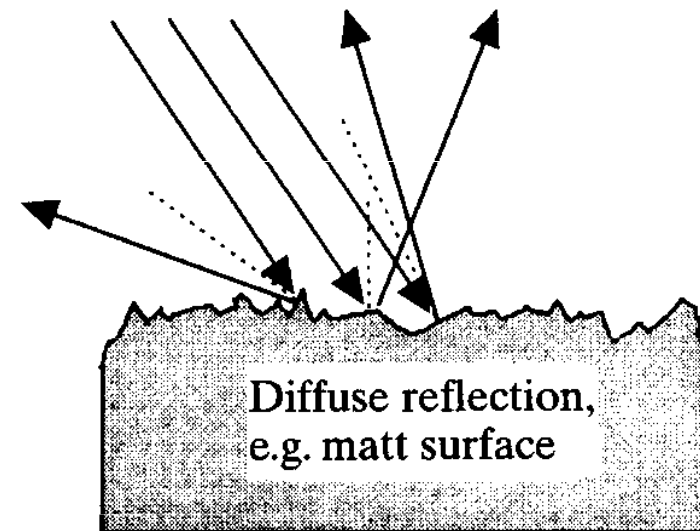
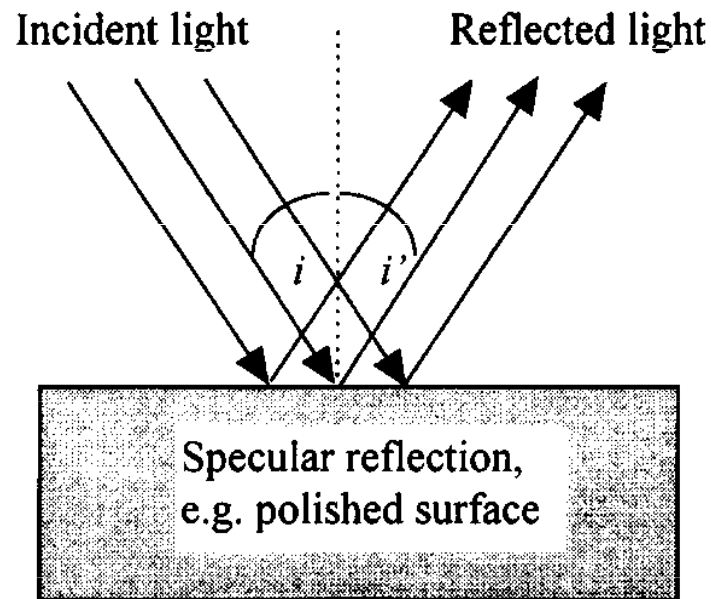
vibrace mřížky



Assuming no transmission through material, $a + r = 1$

Vliv drsnosti povrchu

Drsnější povrchy u téhož materiálu absorbují víc
(větší plocha + různé interakce v důsledku odrazů od povrchu)

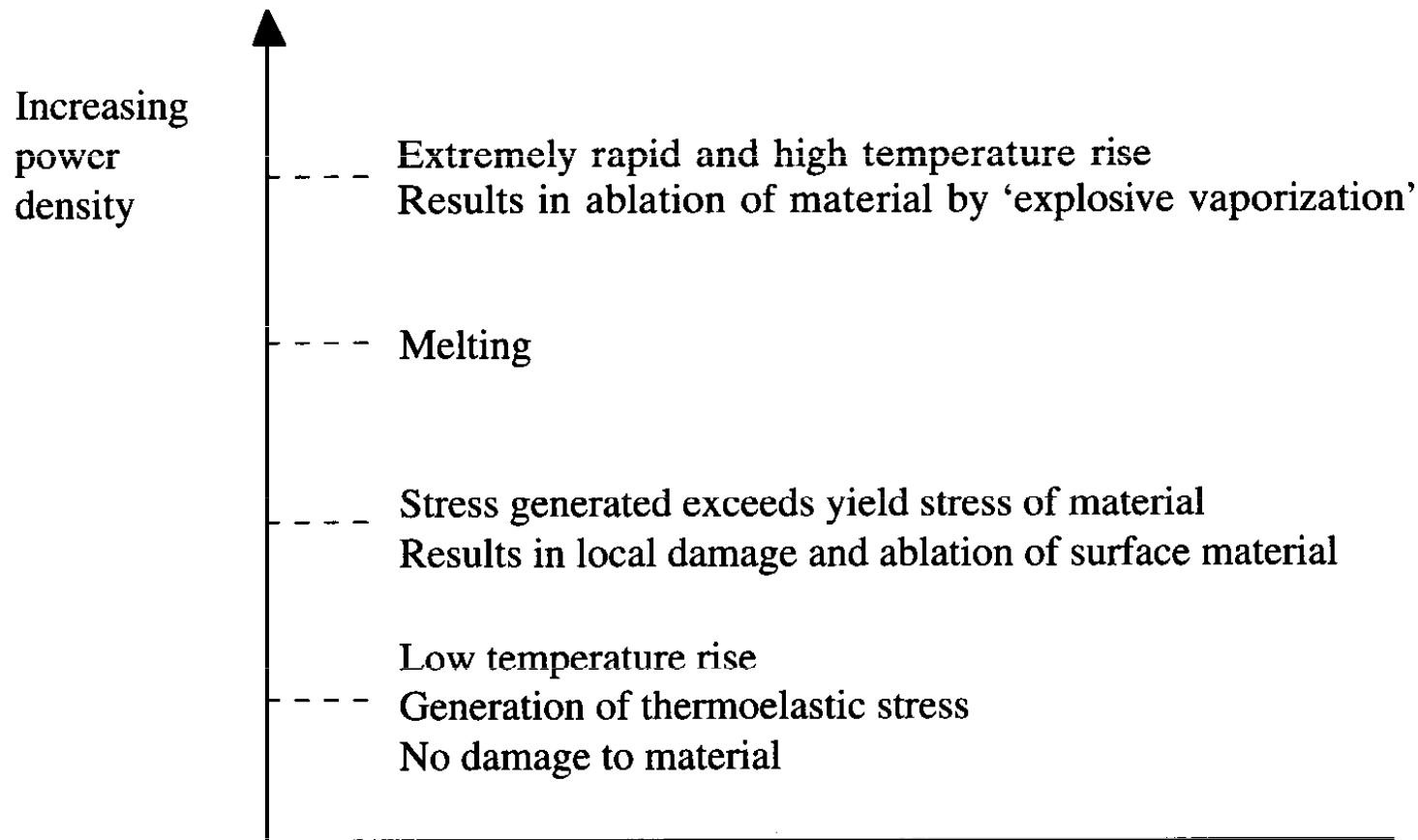


Angle of incidence, i = Angle of reflection, i'

..... Denotes perpendicular to surface

Vliv hustoty výkonu

Hustota výkonu =



Vliv vlnové délky (energie fotonu)

Energie fotonu je nepřímo úměrná vlnové délce laserového záření = UV fotony jsou energetičtější než IR. Energie UV fotonu je vyšší než energie většiny kovalentních vazeb, u IR jde o důsledek multifotonové excitace.

Energie fotonu ($\lambda = 1,06 \mu\text{m}$) = 1,2 eV

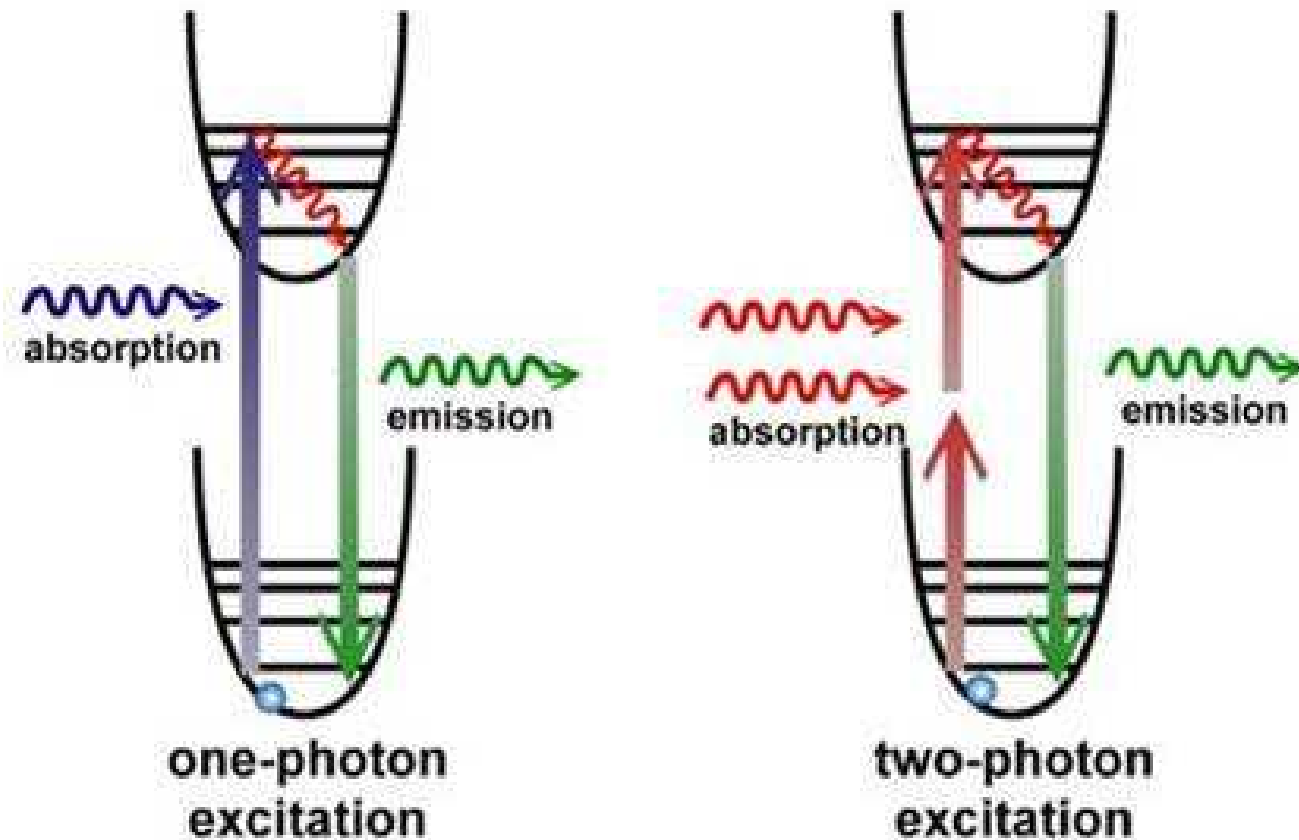
Energie fotonu ($\lambda = 248 \text{ nm}$) = 5,0 eV

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

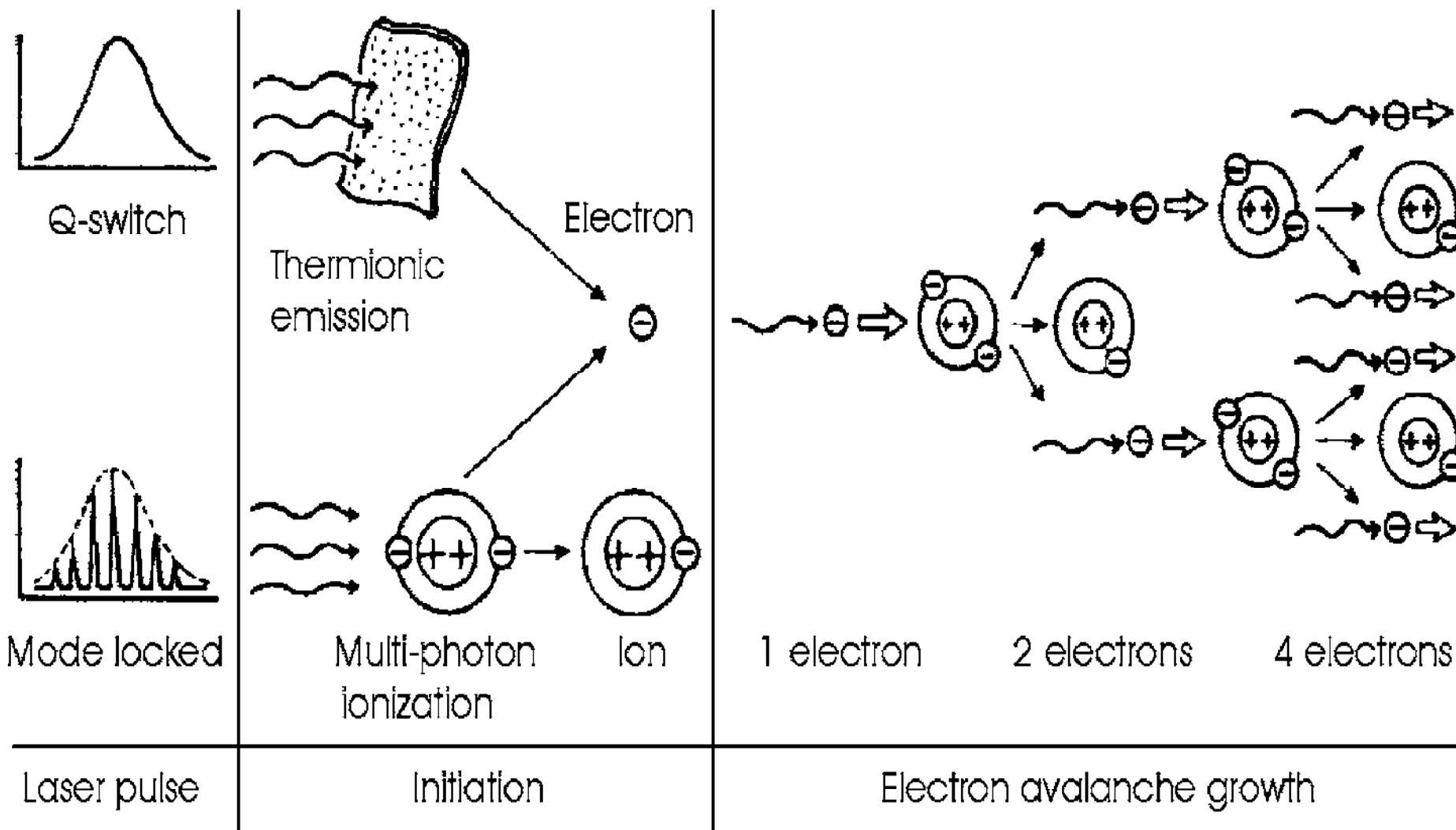
Typ kovalentní vazby	Vazebná energie (eV)
C-C	3,6
C-O	3,7
C-H	4,3
O-H	4,8
C=C	6,4

Multifotonová excitace

Je možná pouze u laserů, který má dostatečně silný tok záření, mizí vliv červeného prahu fotoefektu.



Initiation of ionization with subsequent electron avalanche



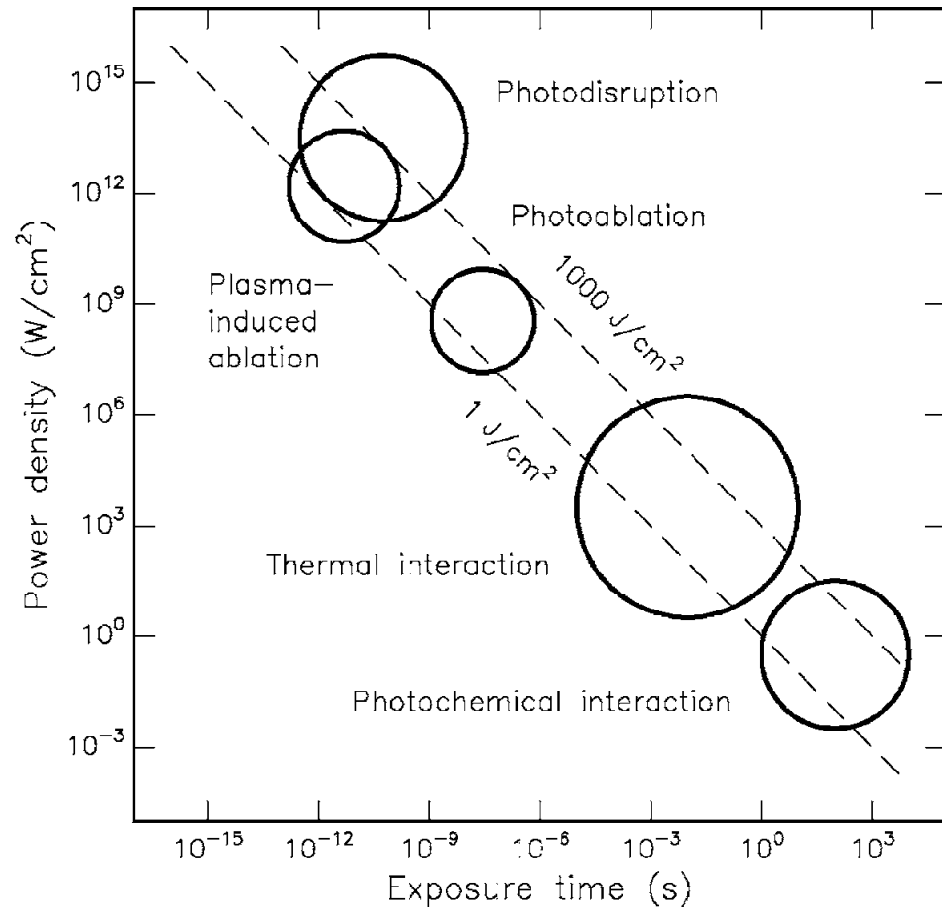
Vlnové délky a energie fotonů pro různé typy laserů

<i>Laser type</i>	<i>Wavelength (nm)</i>	<i>Photon energy (eV)</i>
ArF	193	6.4
KrF	248	5.0
Nd:YLF (4 ω)	263	4.7
XeCl	308	4.0
XeF	351	3.5
Argon ion	514	2.4
Nd:YLF (2 ω)	526.5	2.4
He-Ne	633	2.0
Diode	800	1.6
Nd:YLF	1053	1.2
Nd:YAG	1064	1.2
Ho:YAG	2120	0.6
Er:YAG	2940	0.4
CO ₂	10600	0.1

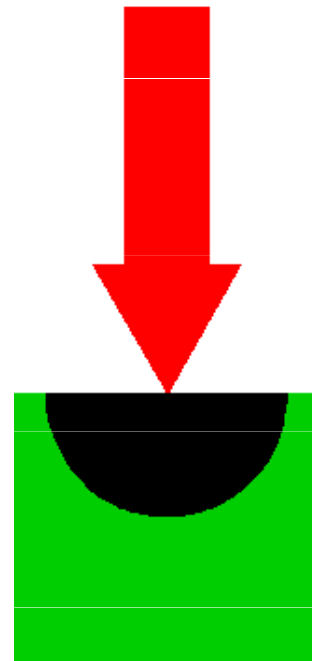
Disociační energie některých typů vazeb

Type of bond	Dissociation energy (eV)
C=O	7.1
C=C	6.4
O-H	4.8
N-H	4.1
C-O	3.6
C-C	3.6
S-H	3.5
C-N	3.0
C-S	2.7

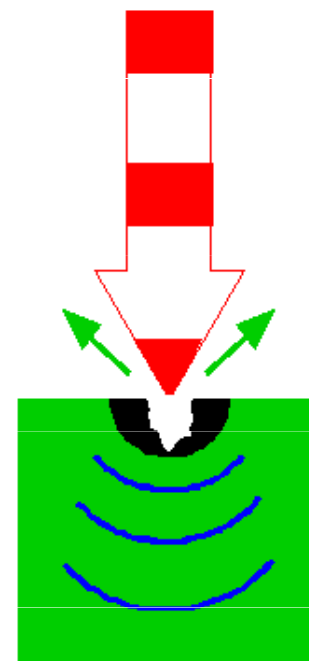
Délka pulsu



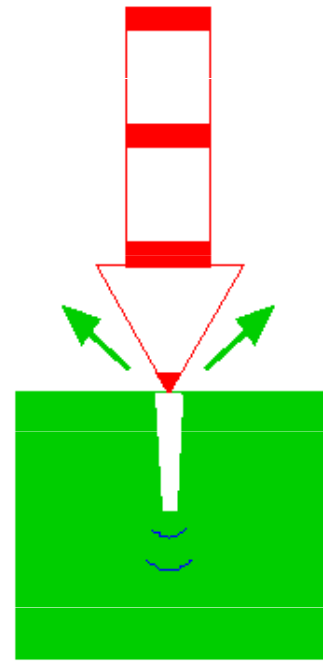
c.w. laser



ns laser



ps/fs laser



Shock waves

Femtosekundový puls

relaxační doba elektronu je 10^{-14} sek = o několik řádů kratší než u iontů krystalové mřížky, dopad vlny – elektron se natáhne, iont má velkou setrvačnost (nehýbe se) – veškerá interakce probíhá pouze s elektrony, po odeznění pulzu elektrony relaxují a následně interagují s iontem mřížky a v důsledku své vysoké energie elektrony dokážou ionty vyrazit z materiálu (ablace).

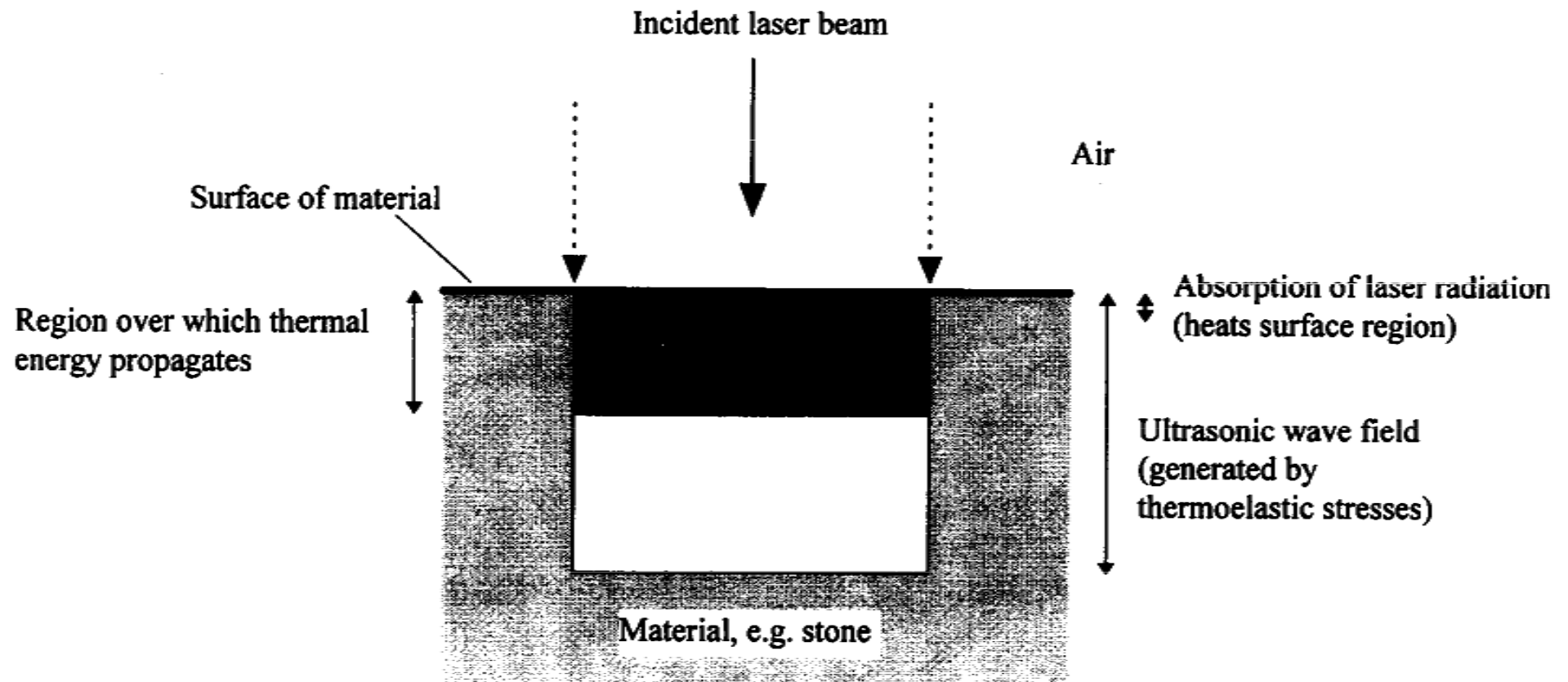
Inverse bremsstrahlung (inverzní brzdná absorpce) – elektrony jsou zpomalovány v elektrickém poli iontu mřížky a předávají jim kinetickou energii.

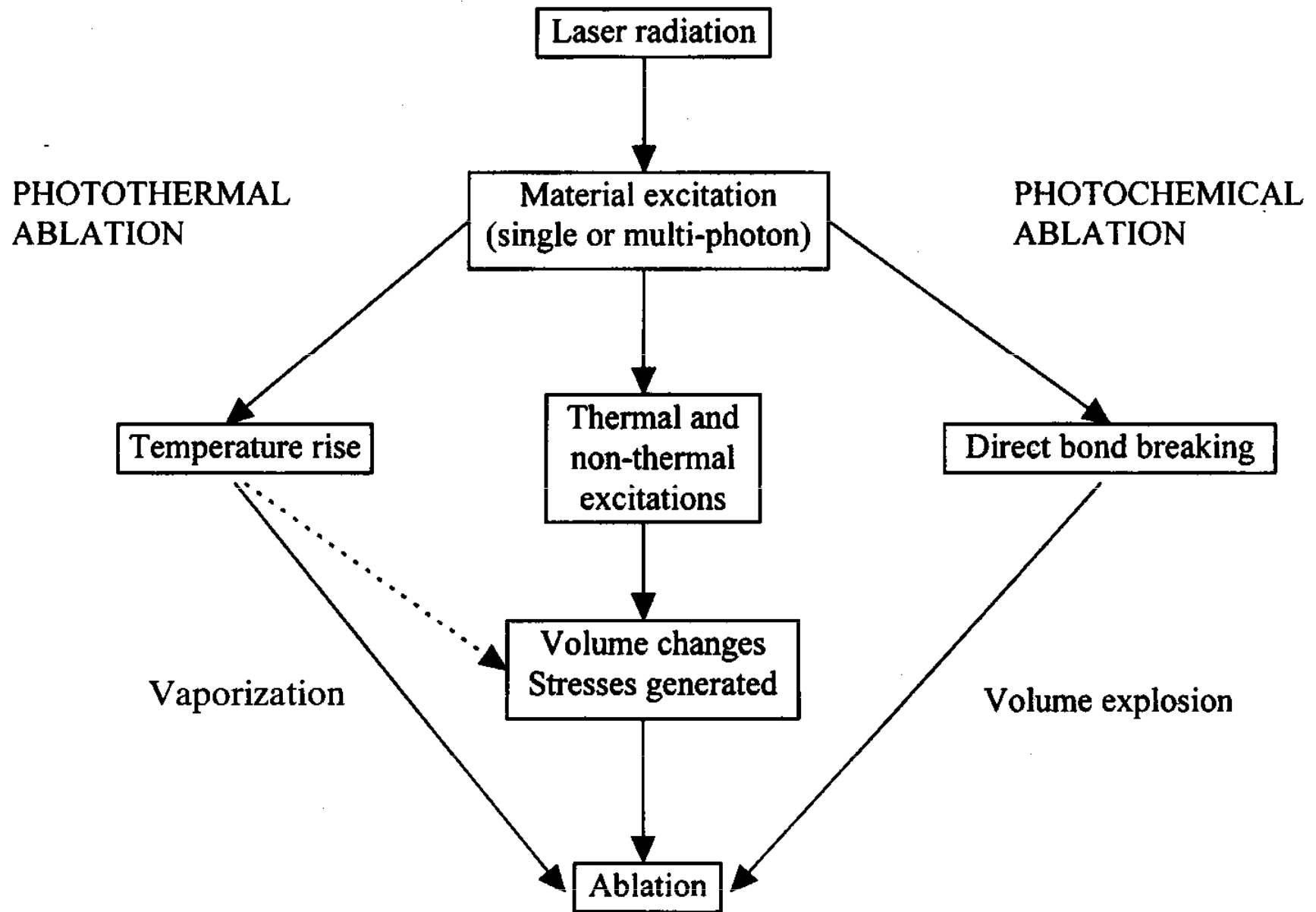
Nanosekundový puls

puls probíhá mnohem déle a proto musí proniknout přes vznikající mikroplasma.

Pokud plazmová frekvence převyšuje frekvenci záření, vzniká odstínění v důsledku vysoké hustoty elektronů a iontů v plazmatu. Paradoxně tak vyšší dodávaná energie může vést k nižší míře ablace.

Interakce laserového záření s materiálem





Photochemická interakce

- Hlavní idea:
selektivní photochemické reakce, vedoucí k některým chemickým transformacím
- Pozorování:
bez makroskopických projevů
- Typické lasery:
červené barvivové lasery, diodové lasery
- Typická délka pulsu:
1 s . . . CW
- Typické hustoty výkonu:
0.01 . . . 50 W/cm²

Termické interakce

- Hlavní idea :
dosažení určité teploty vedoucí k daným termickým efektům
- Pozorování:
koagulace (organika), odpařování, karbonizace nebo tavení
- Typické lasery:
CO₂, Nd:YAG, Er:YAG, Ho:YAG, Ar ion a diodové lasery
- Typická délka pulsu:
1 μs . . . 1min
- Typická hustota výkonu:
10 . . . 10⁶ W/cm²
- Speciální aplikace:
koagulace, odpařování, tavení, tepelný rozklad

Photoablace

- Hlavní idea :
přímé štěpení chemických vazeb UV fotony
- Pozorování:
velmi čistá ablace, spojená se zvukovým projevem a viditelnou fluorescencí
- Typical lasers:
excimerové lasery (ArF, KrF, XeCl, XeF)
- Typická délka pulsu:
10 . . . 100 ns
- Typická hustota výkonu:
10⁷ . . . 10¹⁰ W/cm²

Zdroje UV záření

Light source	Wavelength (nm)
ArF laser	193
KrF laser	248
Hg lamp	254
Nd:YLF laser (4ω)	263
Nd:YAG laser (4ω)	266
XeCl laser	308
XeF laser	351

Mechanismus UV fotoablace

Absorpce UV fotonů



dosažení repulsivních
excitovaných stavů



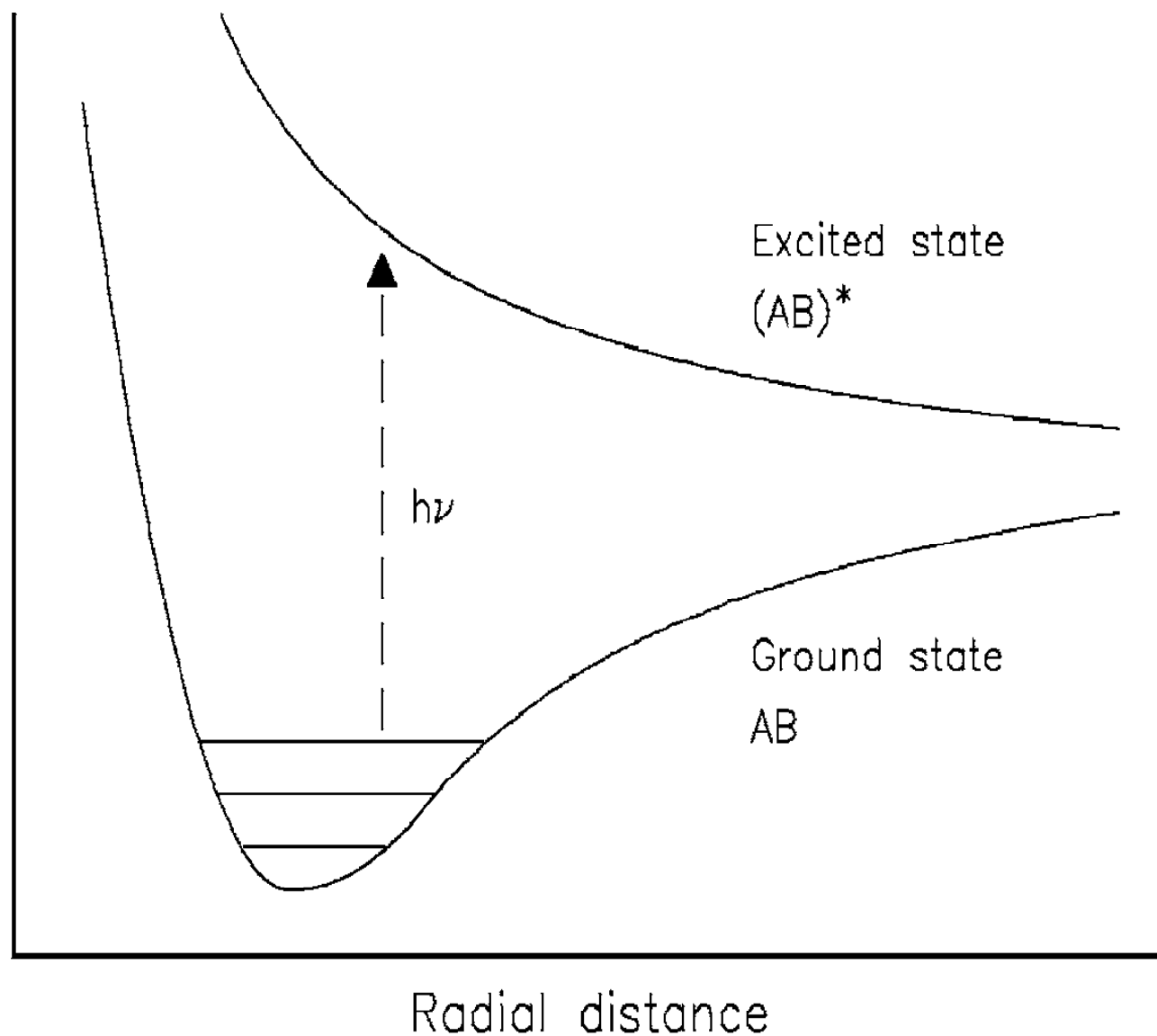
Disociace



Ejekce fragmentů



Ablace



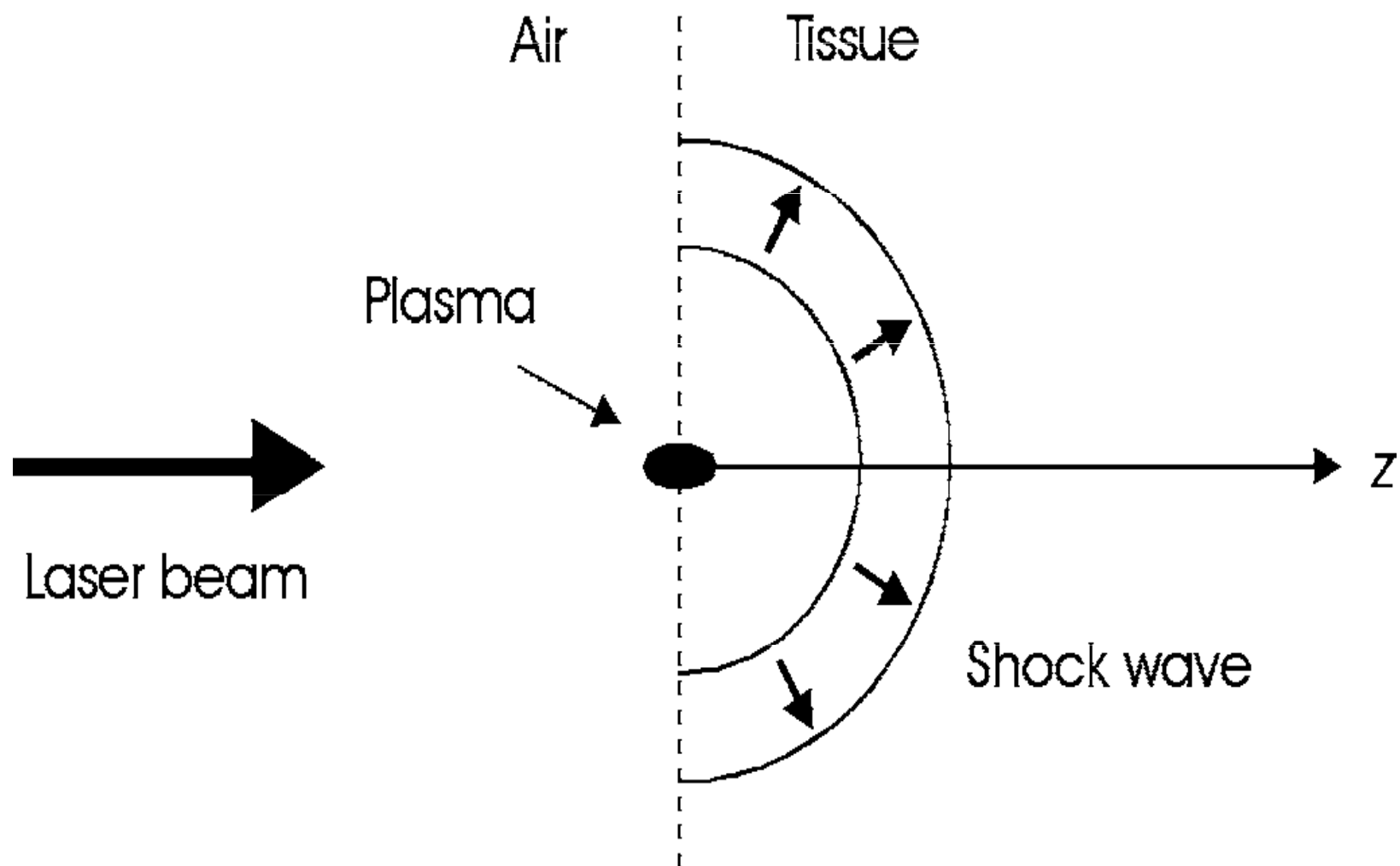
Ablace indukovaná plazmatem

- Hlavní idea :
ablace vznikem plazmatu
- Observations:
velmi čistá ablace, spojená s akustickým projevem a záblesky plazmatu
- Typické lasery:
Nd:YAG, Nd:YLF, Ti:Sapphire
- Typická délka pulzu:
100 fs . . . 500 ps
- Typická hustota výkonu:
 10^{11} . . . 10^{13} W/cm²

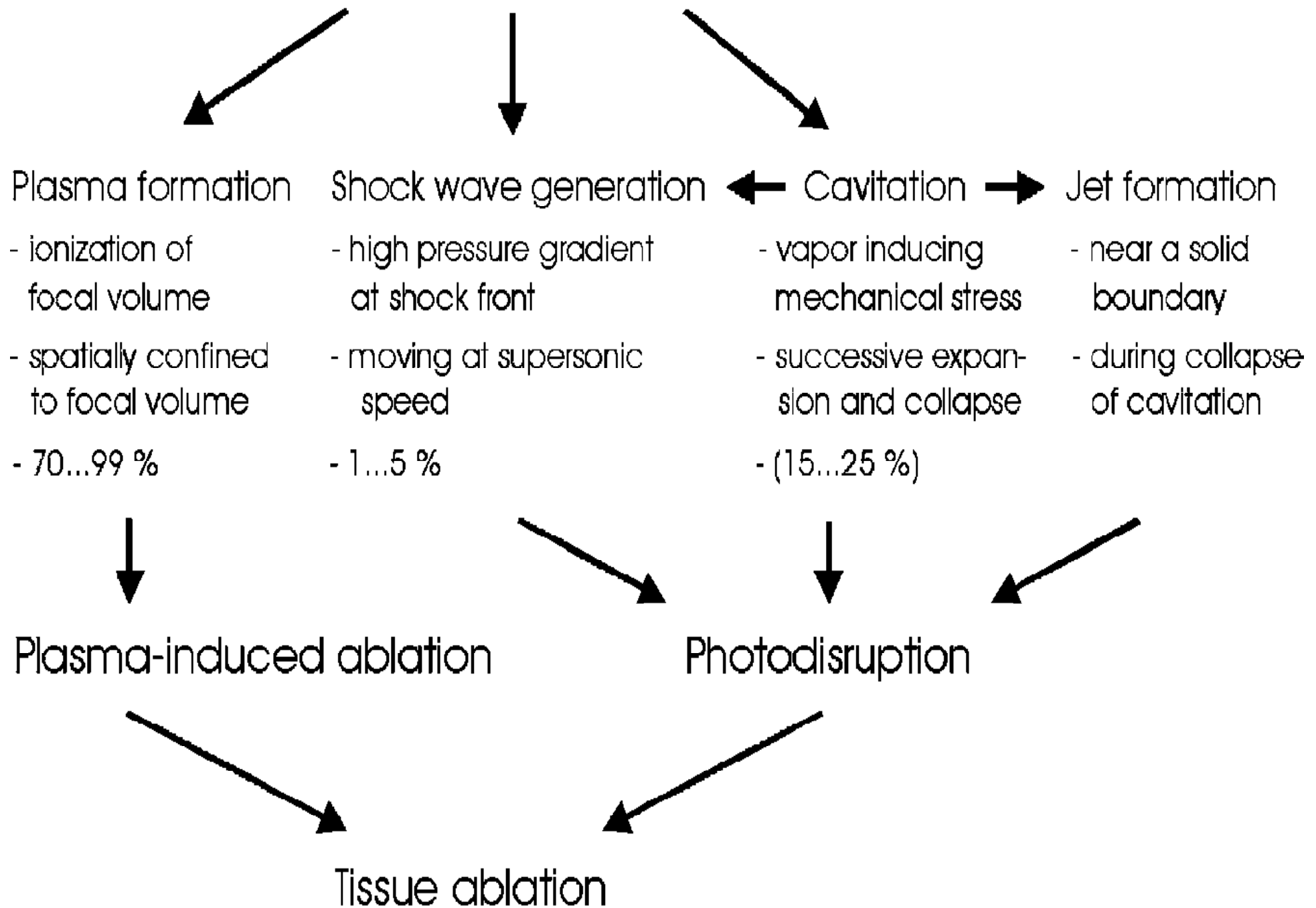
Photodisrupce

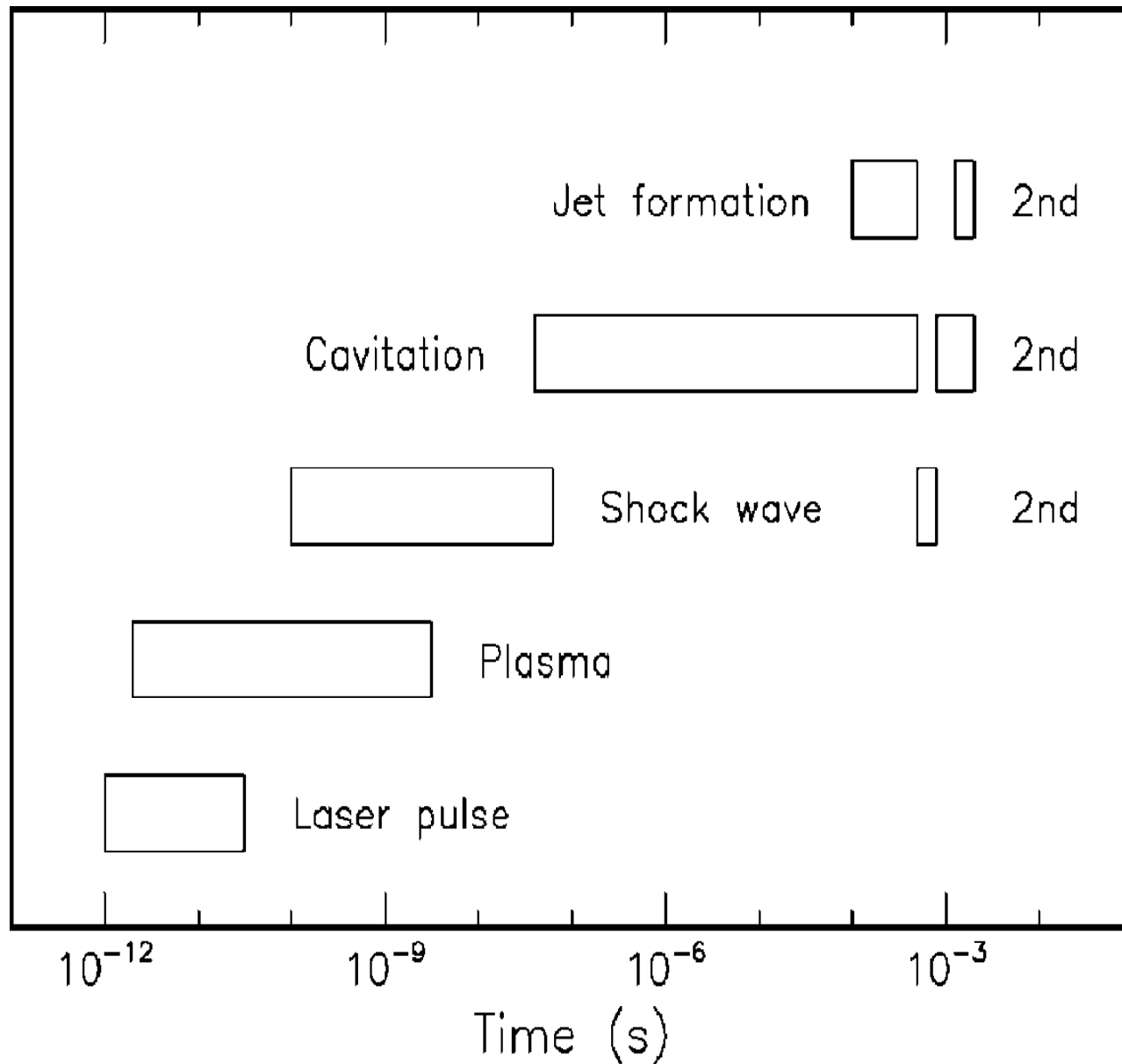
- Hlavní idea : fragmentace materiálu mechanickou silou
- Pozorování: záblesky plazmatu, vznik kavitace rázovou vlnou
- Typické lasery: pevnolátkové lasery, tj. Nd:YAG, Nd:YLF, Ti:Sapphire
- Typická délka pulzu: 100 fs . . . 100 ns
- Typická hustota výkonu: 10^{11} . . . 10^{16} W/cm²

Rázová vlna



Optical breakdown





Approximate time scale for all processes contributing to photodisruption. Assumed is a 30 ps laser pulse. The first and second occurrences of shock wave, cavitation and jet formation are indicated

Tvorba plazmatu

Při velmi vysokých hustotách výkonu se při ablaci materiálu tvoří plazma. Materiál se odpaří velmi brzy během pulsu, oblak plynů těsně nad povrchem absorbuje část energie laserového pulsu což vede k intenzivnímu zahřátí a ionizaci uvolněného materiálu a tvoří se plazma.

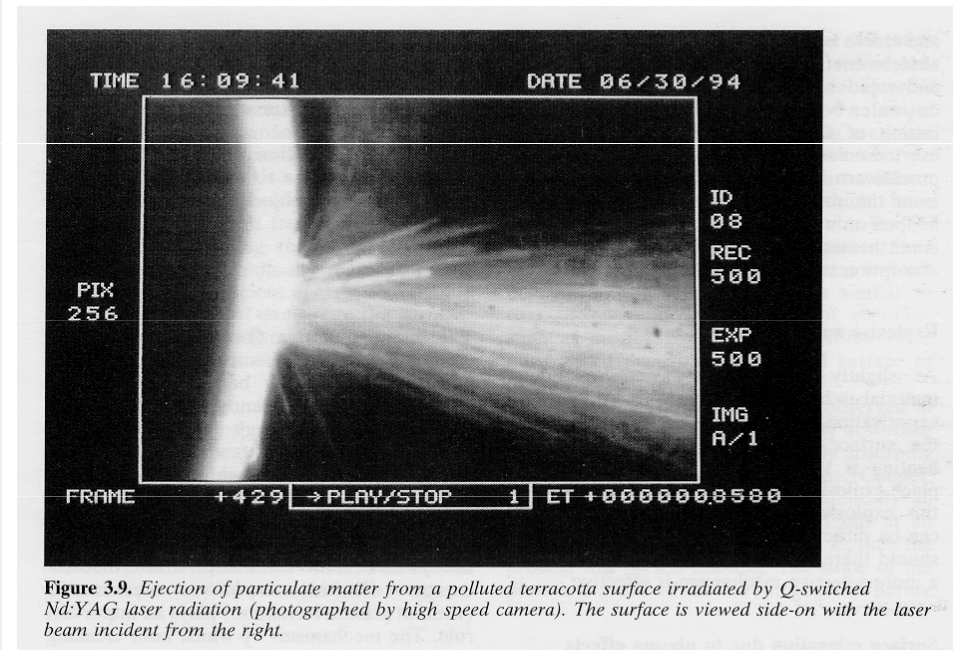
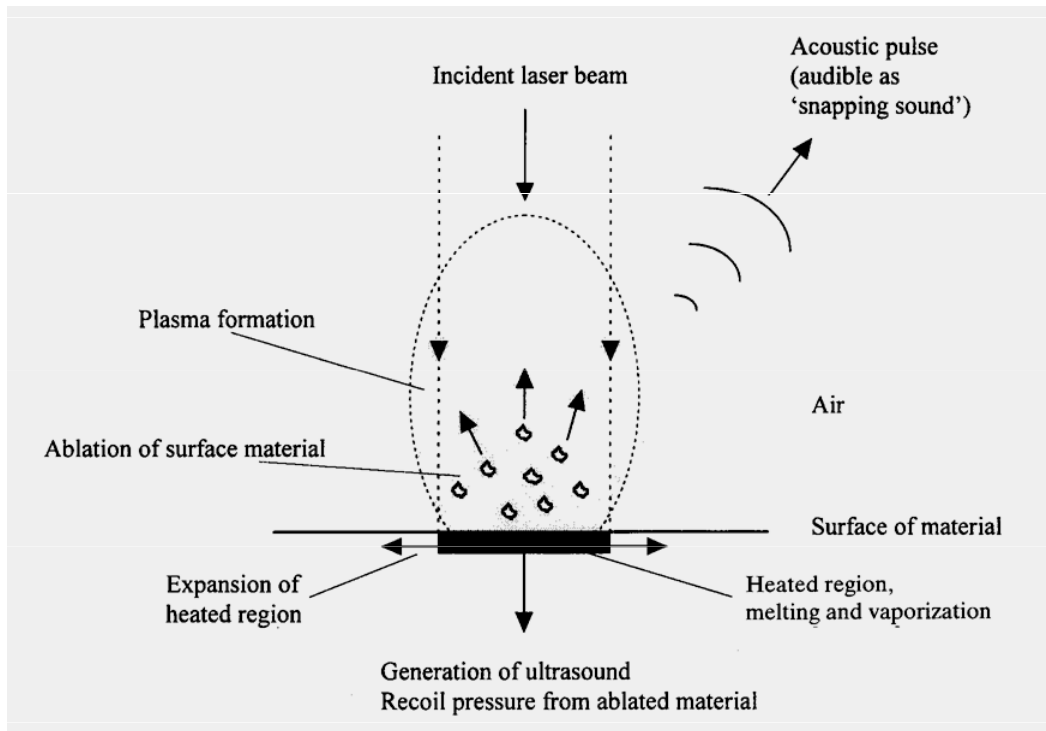
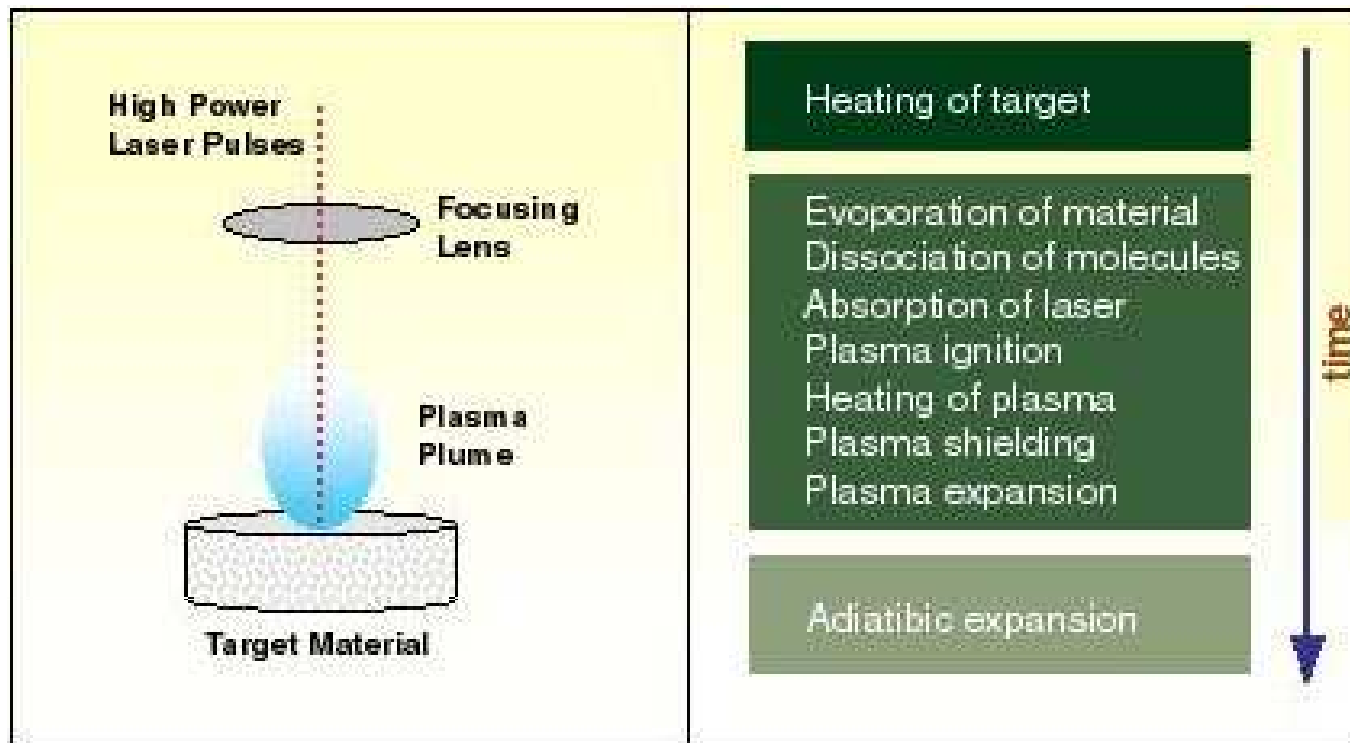


Figure 3.9. Ejection of particulate matter from a polluted terracotta surface irradiated by Q-switched Nd:YAG laser radiation (photographed by high speed camera). The surface is viewed side-on with the laser beam incident from the right.



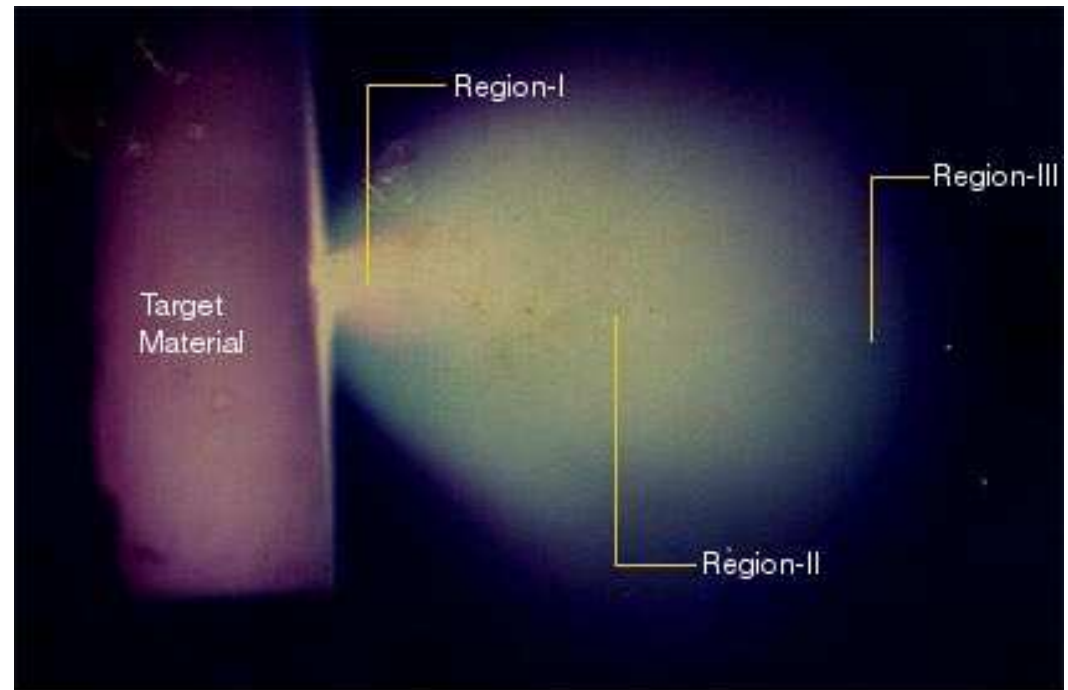
Evolution of laser induced plasma from a target material

Plasma silně absorbuje energii laserového pulsu a stává se extrémně horkým. Pokud hustota částic v plazmatu dosáhne kritické hodnoty, plasma slouží jako štít bránící energii pulsu proniknout k povrchu = energie je silně absorbována velmi tenkou vrstvičkou plazmatu, která se extrémně ohřívá, expanduje a produkuje impulsní reakci na povrch. Po ukončení pulsu plasma expanduje od povrchu a disipuje.

Region-I: centrální (core) část. Emise plazmatu blízko povrchu vzorku, kde je teplota maximální a většina specií je v ionizovaném stavu.

Region-II: Střední oblast. Vedle ionizovaných specií, jsou přítomny také neutrální částice a určitý počet molekulárních specií.

Region-III: okrajová oblast plazmatu. Jeho teplota je menší a je vyšší zastoupení molekulárních specií.



Laser produced plasma plume from a metal target

Vznik akustického pulzu

Důsledkem rázové vlny je i vznik akustického pulzu:

Za **nízkých hustot výkonu** (ne ablace) absorpce záření a následné ohřátí a termická expanze povrchu vede k rychlé expanzi a kompresi molekul vzduchu těsně nad povrchem.

Při **vyšších hustotách výkonu** ablace generuje ve vzduchu nad ozářeným povrchem akustické vlny (praskání).

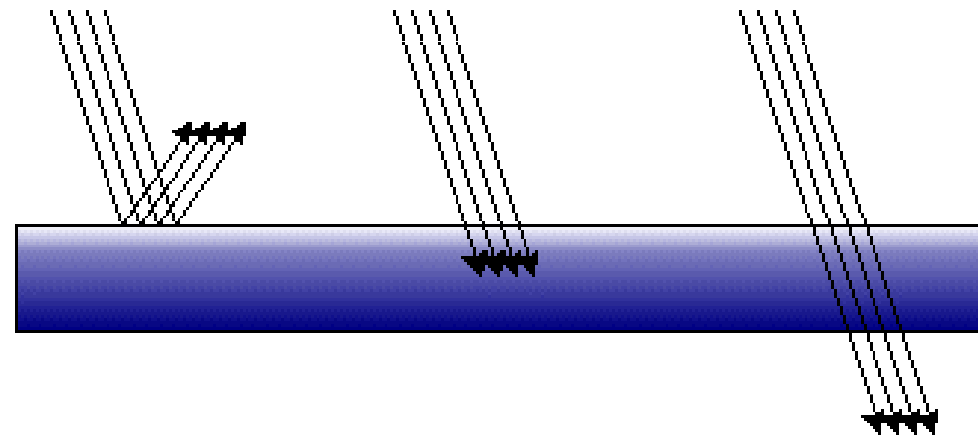
Při **velmi vysokých hustotách výkonu** vzniklé plazma generuje šokové pulzy. amplituda akustické vlny generované ve vzduchu v důsledku absorpce laserového záření je závislý na interakci mezi pulsem a povrchem.

Radiační tlak

Radiační tlak = důsledek změny hybnosti fotonů v důsledku jejich absorpce a odrazu na povrchu. vzniklé síly a stresy jsou o několik řádů menší než u předchozích procesů.

Radiation Pressure Coefficient

© Blaze Labs Research



Total Reflection

$$Q_{PR} = 2$$

Total Absorption

$$Q_{PR} = 1$$

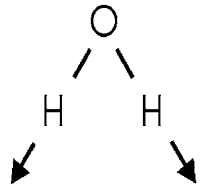
Total Transmission

$$Q_{PR} = 0$$

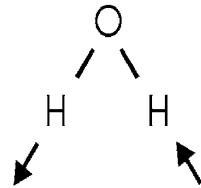
Interakce laseru s kapalinou

Absorpce vody

Symmetric vibration
(1.08×10^{14} Hz)



Asymmetric vibration
(1.13×10^{14} Hz)



Fokusované rázové vlny šířící se v kapalině bývají doprovázeny vznikem kavitací.

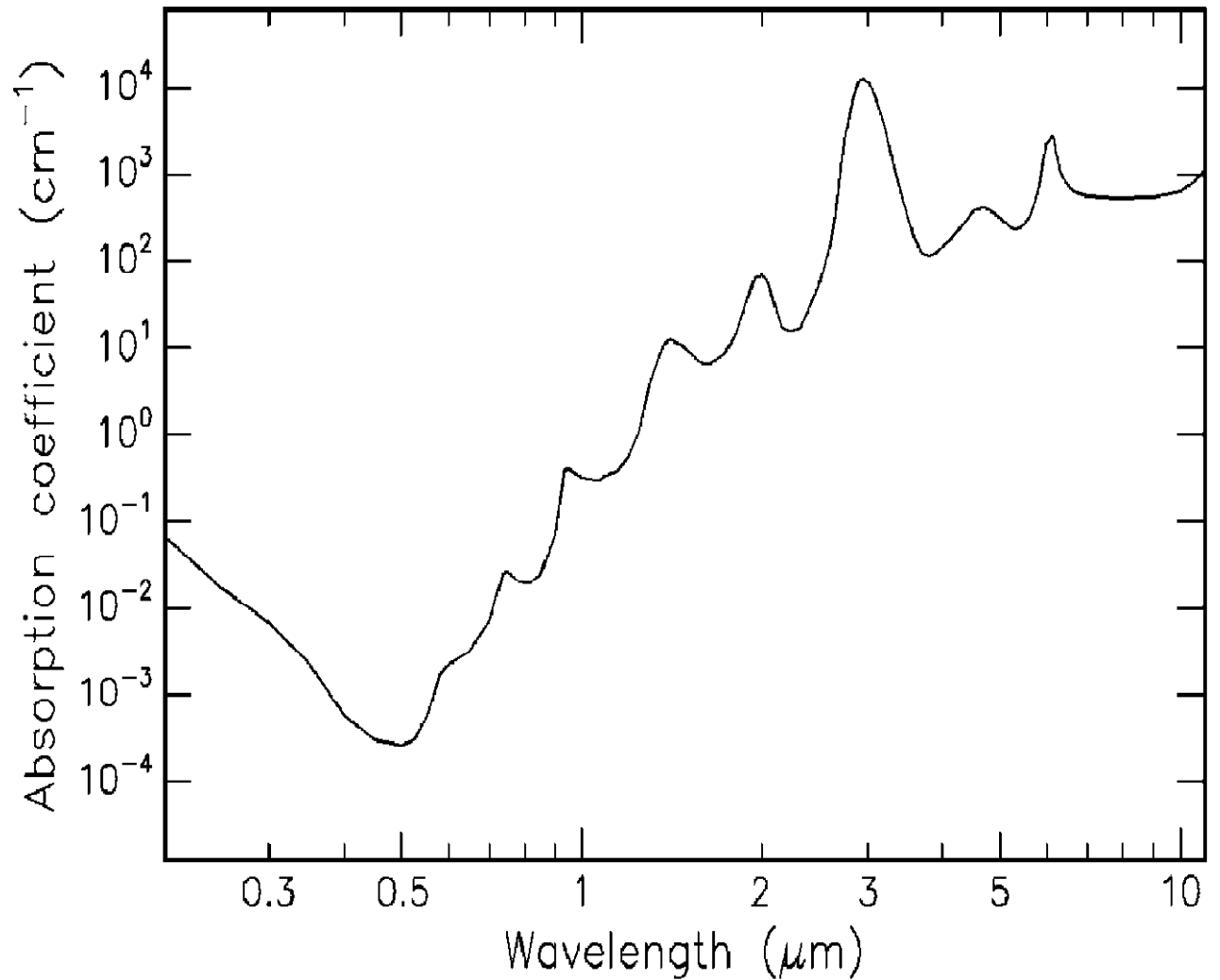


Table 3.3. Absorption coefficients α and absorption lengths L of water at different wavelengths.

Wavelength (nm)	Laser type	α (cm ⁻¹)	L (cm)
193	ArF	0.1	10
248	KrF	0.018	55
308	XeCl	0.0058	170
351	XeF	0.0023	430
514	Argon ion	0.00029	3400
633	He-Ne	0.0029	340
694	Ruby	0.0056	180
800	Diode	0.020	50
1053	Nd:YLF	0.57	1.7
1064	Nd:YAG	0.61	1.6
2120	Ho:YAG	36	0.028
2940	Er:YAG	12 000	0.00008
10600	CO ₂	860	0.001

Kavitace

Kavitace (z latinského *cavitas* - dutina) je vznik dutin v kapalině při lokálním poklesu tlaku, následovaný jejich implozí. Pokles tlaku může být důsledkem lokálního zvýšení rychlosti (tzv. hydrodynamická kavitace), případně průchodu intenzivní akustické vlny v periodách zředění (akustická kavitace). Kavitace je zpočátku vyplněna vakuem, později do ní mohou difundovat plyny z okolní kapaliny. Při vymizení podtlaku, který kavitaci vytvořil její bublina kolabuje za vzniku rázové vlny s destruktivním účinkem na okolní materiál.

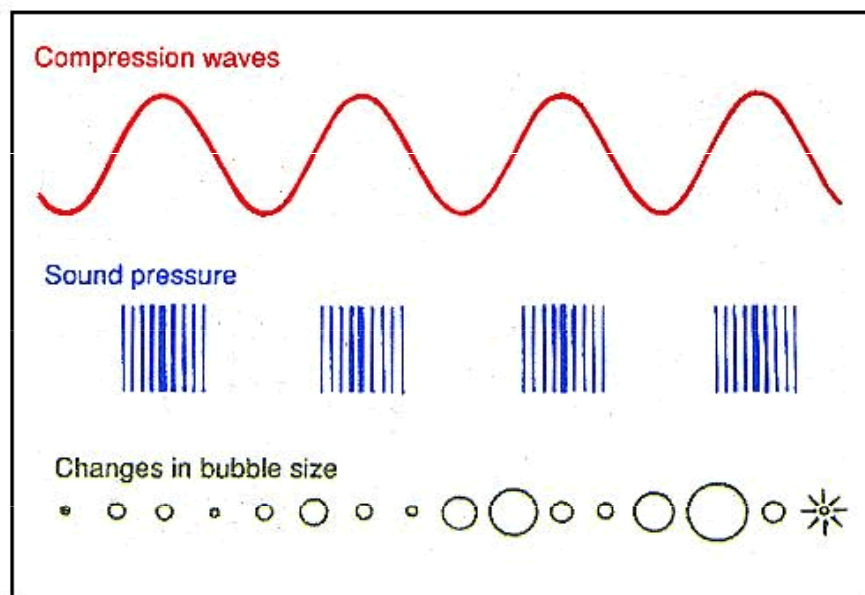
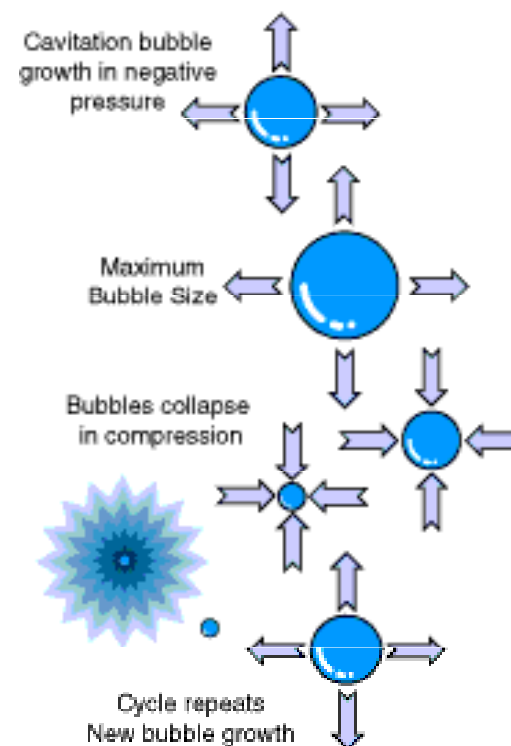
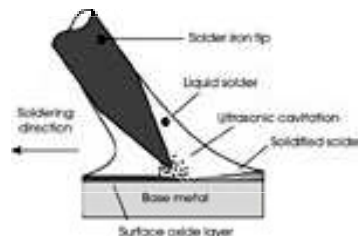
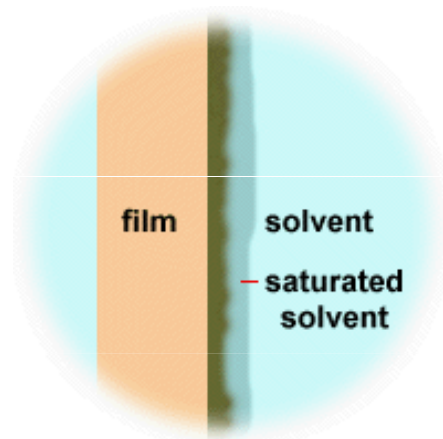


Figure 2 Irradiating liquids with ultrasonic radiation produces bubbles which then implode. Cavities can form and grow during negative pressure cycles of the acoustic waves. When the cavity grows to a certain size, they collapse violently, generating intense heat and tremendous pressure



Kavitace a mechanismus čištění ultrazvukem

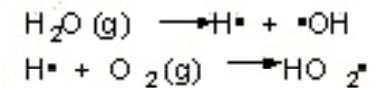
Běžně se efektů kavitace využívá k čištění špatně dostupných míst na malých předmětech (např. k čištění šperků). Předmět je umístěn do vodní lázně a zdroj ultrazvuku v lázni vyvolává akustickou kavitaci, která narušuje nečistoty na povrchu.



Cavitation Bubble

Thermolytic Center

State: Gaseous
 Collapse Temperature: ~3360 K
 Collapse Pressure: ~313 atm
 Resonant Radius: 5 μm - 200 μm
 Lifetime: ~O(10) μs
 Thermolysis of water vapor and volatile compounds



Interfacial Region

State: Fluid under extreme conditions
 Collapse Temperature: ~1900 K
 Width: ~200 nm
 Lifetime: < 2 μs
 OH Concentration: ~4 mM
 Oxidation & thermolysis of non-volatile and ionic compounds

Bulk Region

State: Liquid
 Temperature: Ambient
 Accumulation of H_2O_2