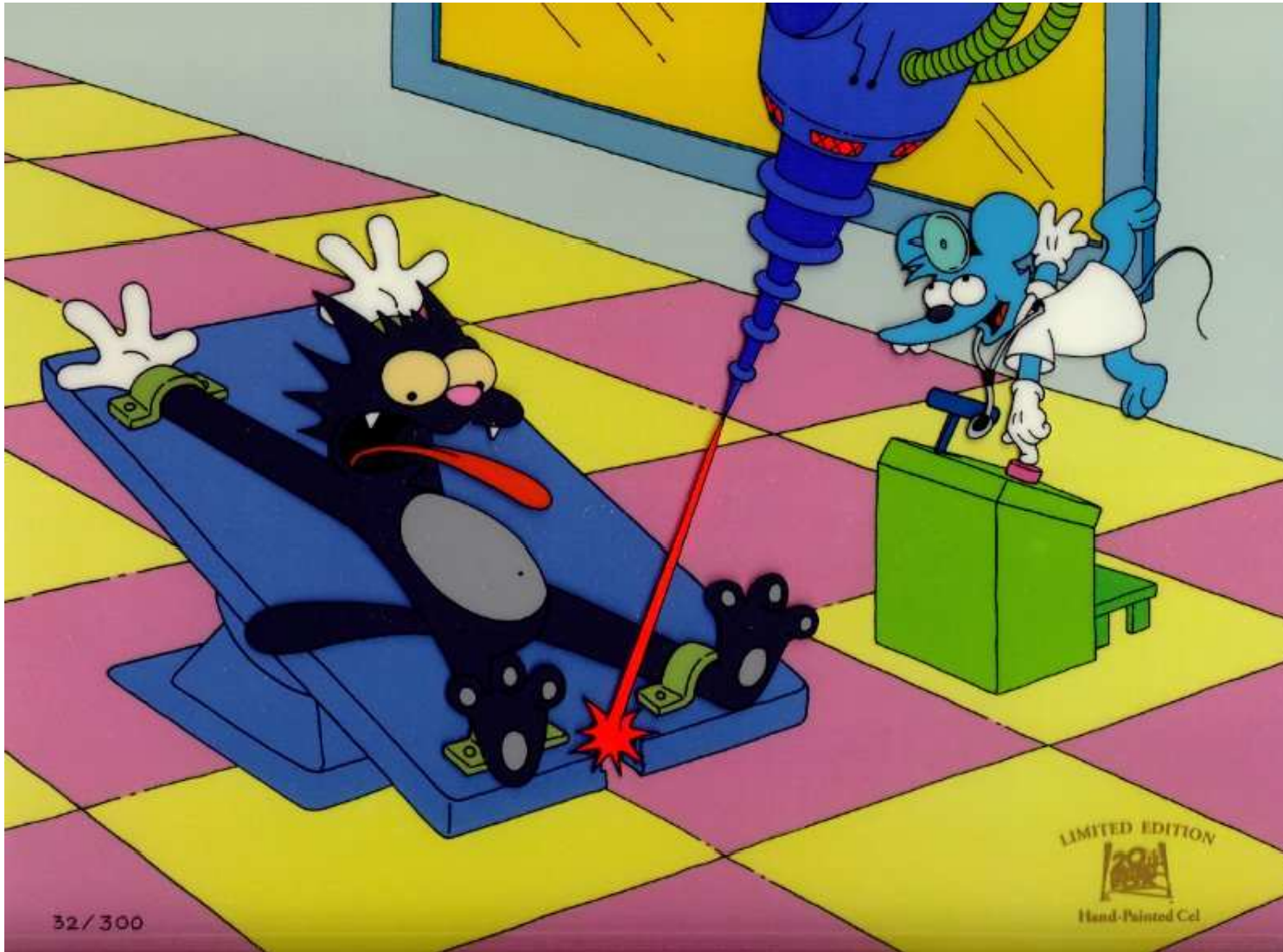


Interakce laserů s materiálem

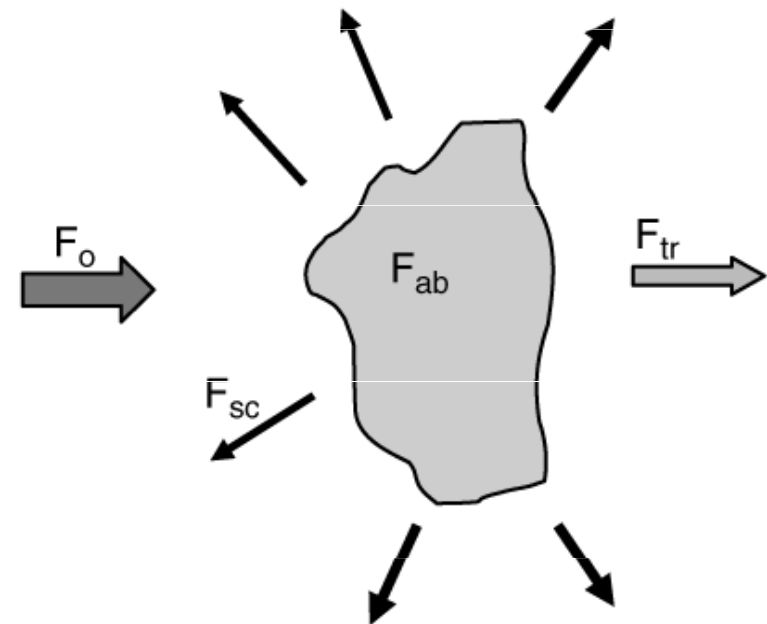


Interakce laserů s materiálem

$$F_0 = F_{ab} + F_{sc} + F_{tr}$$

Dopadající záření o fluenci F_0 interaguje s materiálem. F_{ab} , F_{sc} a F_{tr} jsou absorbovaná, rozptýlená a propuštěná část záření.

$$F_{ab} = F_{th} + F_{ph} + F_{fl}$$



Absorbovaná fluence F_{ab} může v materiálu způsobit termický efekt (F_{th}) nebo fotochemickou modifikaci (F_{ph}), část může být vyzářena jako fluorescence nebo fosforescence (F_{fl}).

Vlastnosti materiálu

koeficient odrazu (reflectivity) pro danou vlnovou délku

koeficient absorpce (absorptivity) pro danou vlnovou délku

koeficient rozptylu (scattering) pro danou vlnovou délku

drsnost povrchu

tepelná vodivost

tepelná kapacita

Parametry laseru a záření

vlnová délka (energie fotonu)

fluence (energie na jednotku plochy)

intenzita

délka pulsu

pulse repetition rate

hustota výkonu

mód (kontinuální / pulsní)

kvalita paprsku

koherenční délka

Druh okolní atmosféry

vzduch

inertní atmosféra (He, Ar)

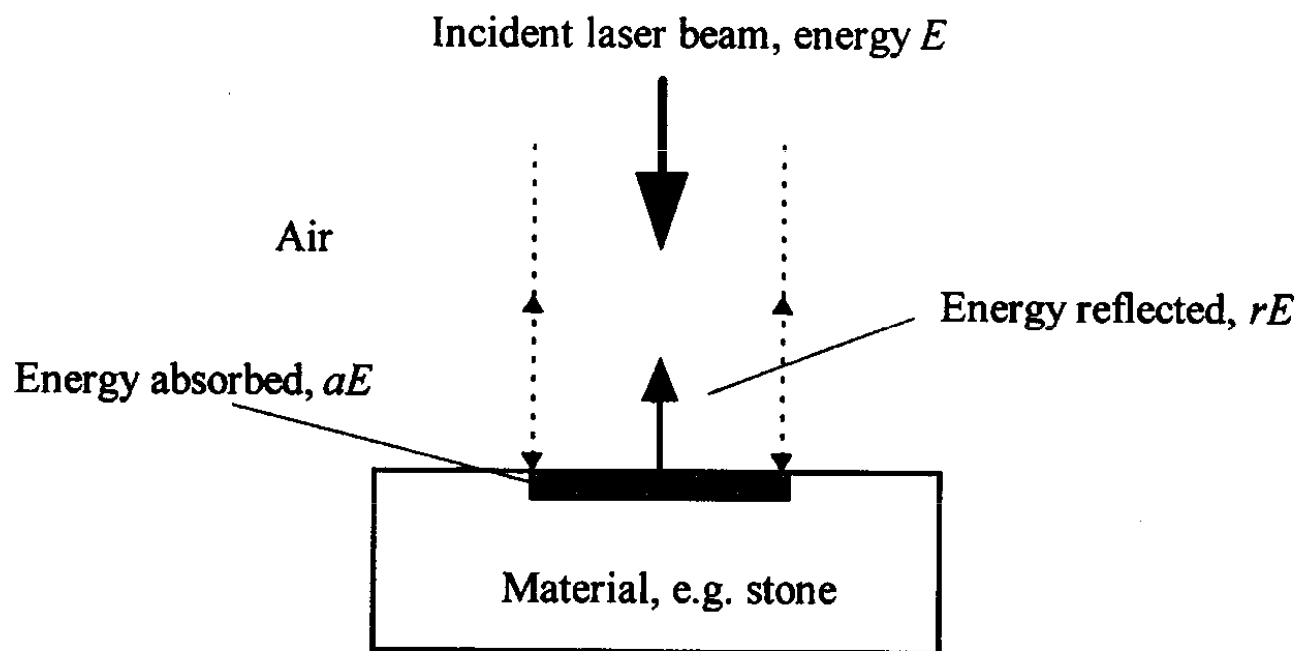
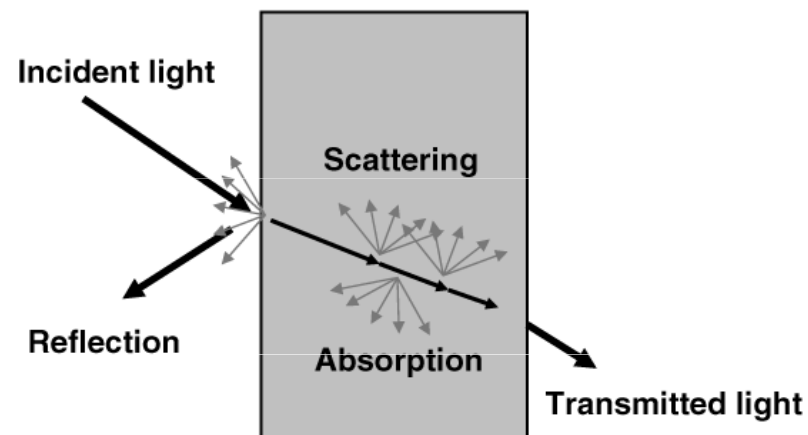
vakuum

Sekundární efekty: oxidace, nitridace, absorpce záření atmosférou

Absorpce záření

Lambert – Beerův zákon

$$I = I_0 e^{-\mu A l}$$



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

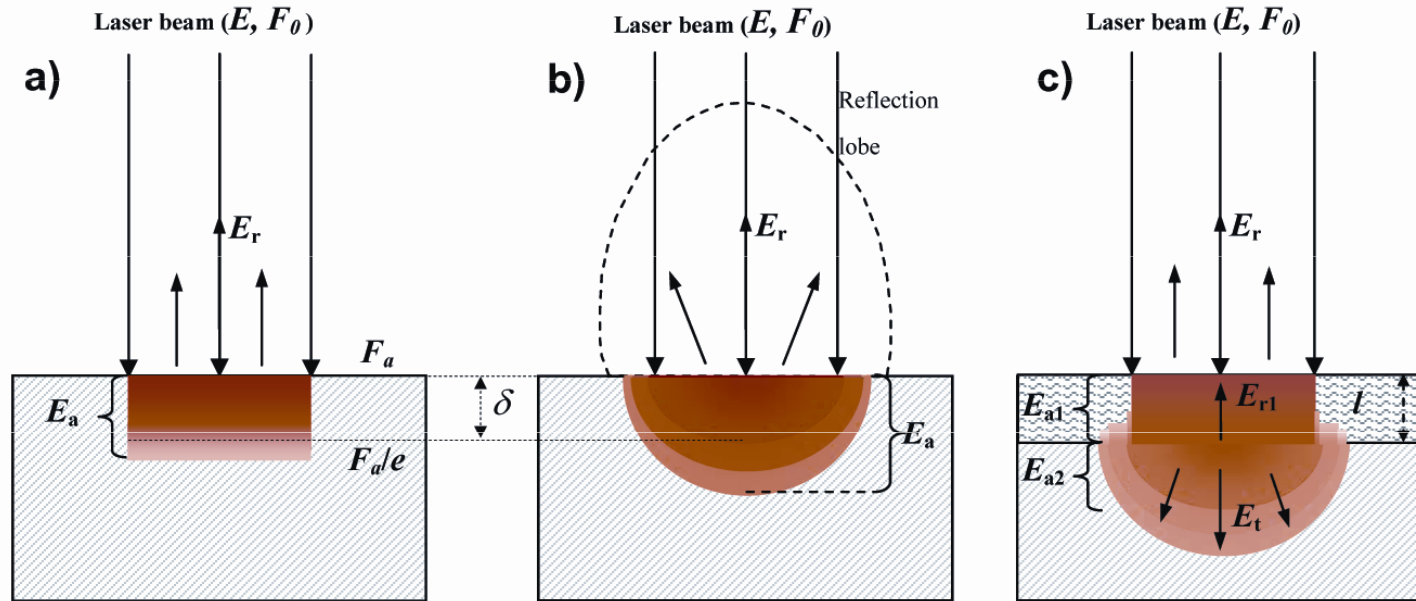


Fig. 2.1.1: Representation of energy redistributions in laser-material interaction: absorbing material (a), diffusing material (b), and the adjacent absorbing and diffusing materials layers (c). E_r , E_a =reflected and absorbed energies.

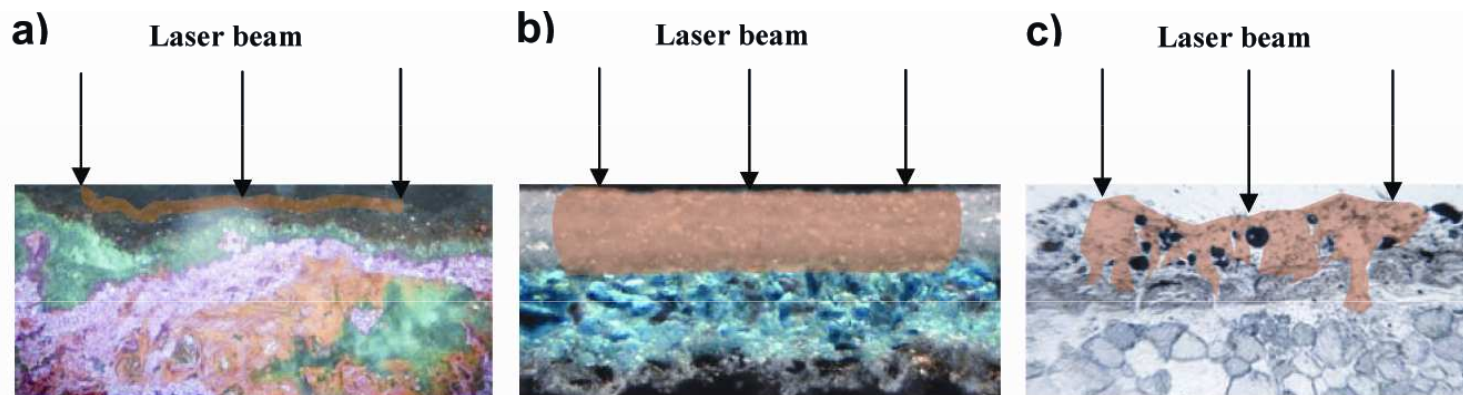


Fig. 2.1.2: Examples of material layers with different optical properties: a) absorbing, b) diffusing, c) intermediate situation. a) bronze-like organic binder patination on a mineralised bronze surface. b) whitewash layer on a paint azurite layer. c) Typical gypsum-matrix black crust on Ca-oxalates film and white marble substrate. The represented optical distributions are purely qualitative.

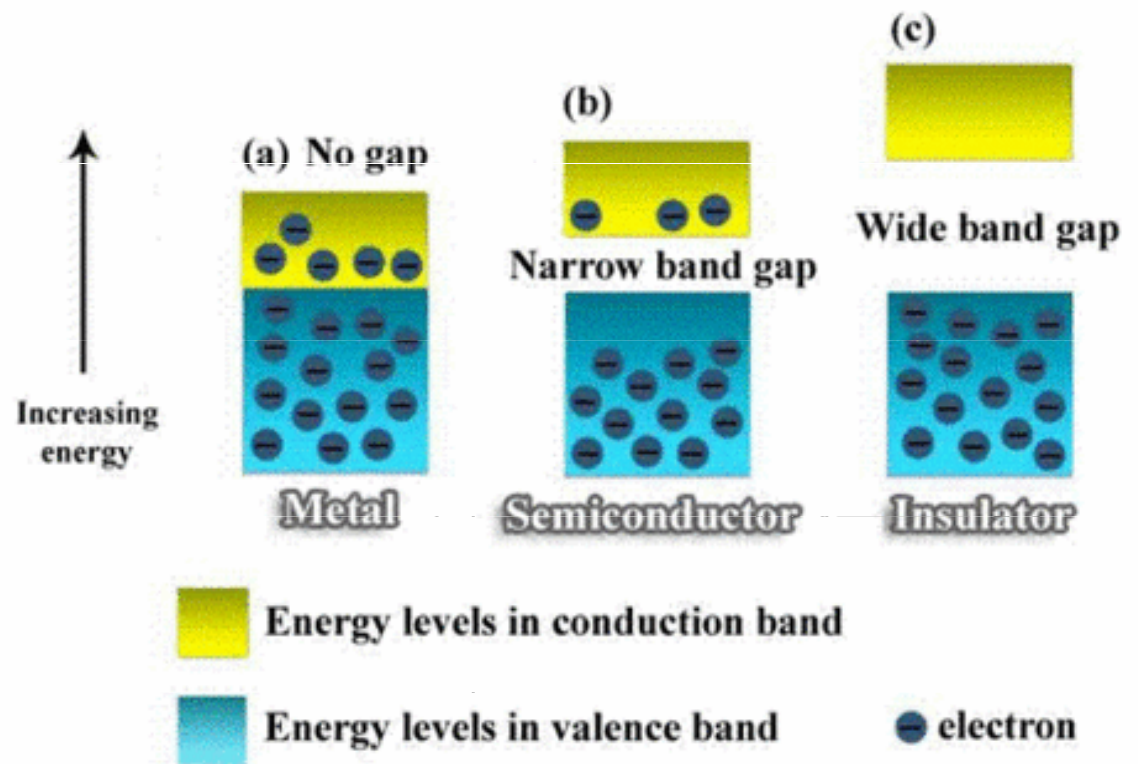
Absorpce záření

absorpce volnými elektrony (kovy)

vázanými elektrony (polovodiče) = excitace

vibrace mřížky

Excitace elektronů v molekule



Kovy

Interakce elektromagnetického záření s volnými elektrony v kovech je silná, penetrační hloubka záření je jen několik vlnových délek (skin depth). Absorpční koeficient kovů v blízké UV, VIS a blízké IR je mezi 10^5 a 10^7 cm^{-1} .

Reflektivita kovů v VIS se pohybuje mezi 0.25 a 0.95, v IR mezi 0.90 a 0.99; reflektivita výrazně klesá při vlnových délkách pod 300 nm (elektrony nemohou odpovídat na vysokou frekvenci UV záření). Některé kovy (Au, Cu) vykazují selektivní absorpci (= excitace elektronů v d-orbitalech) a tudíž i selektivní odraz (je zodpovědný za zbarvení těchto kovů).



Polovodiče a nevodiče

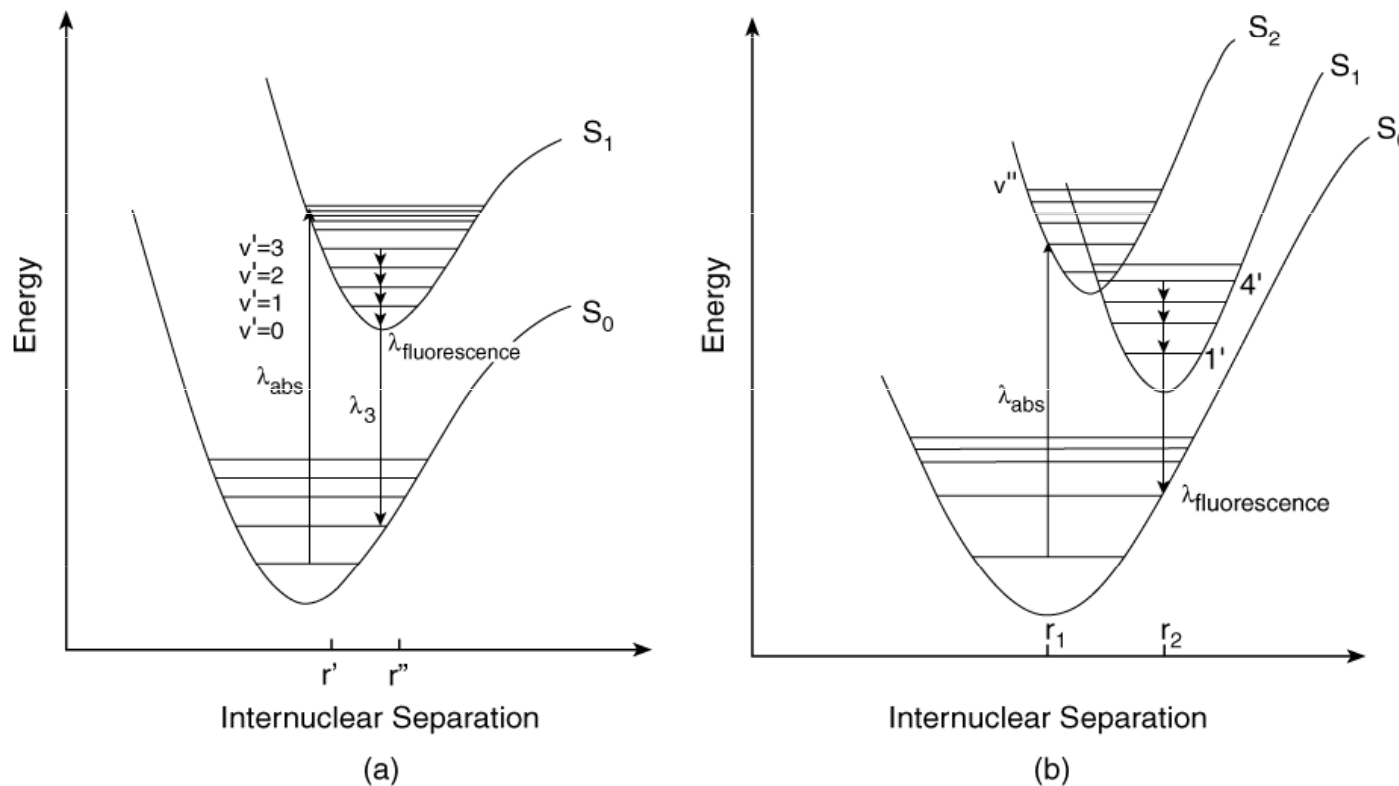
Zakázaný pás u **polovodičů** je úzký, za pokojové teploty je dostatečné množství elektronů tepelně excitováno do vodivostního pásu. K excitaci u polovodičů dochází v blízké IR a VIS (mezní vlnová délka).

Pro **nevodiče**, díky širokému zakázanému pásu, nejsou téměř žádné nosiče náboje za pokojové teploty termicky excitovány do vodivostního pásu a přechody mezi pásy se dějí jen v při excitaci v UV nebo VUV. V iontových materiálech (např. NaCl) jsou valenční elektrony silně lokalizovány na negativním iontu, optické spektrum obsahuje některé znaky atomových spekter (rezonance).

Reálné materiály (nevodiče a polovodiče) nejsou ideálně krystalické, vykazují různé defekty, které umožňují zaujímat elektronové stavy v zakázaném pásu. Tyto stavy jsou hlavně v VIS, materiály se jeví jako zbarvené.

Molekuly

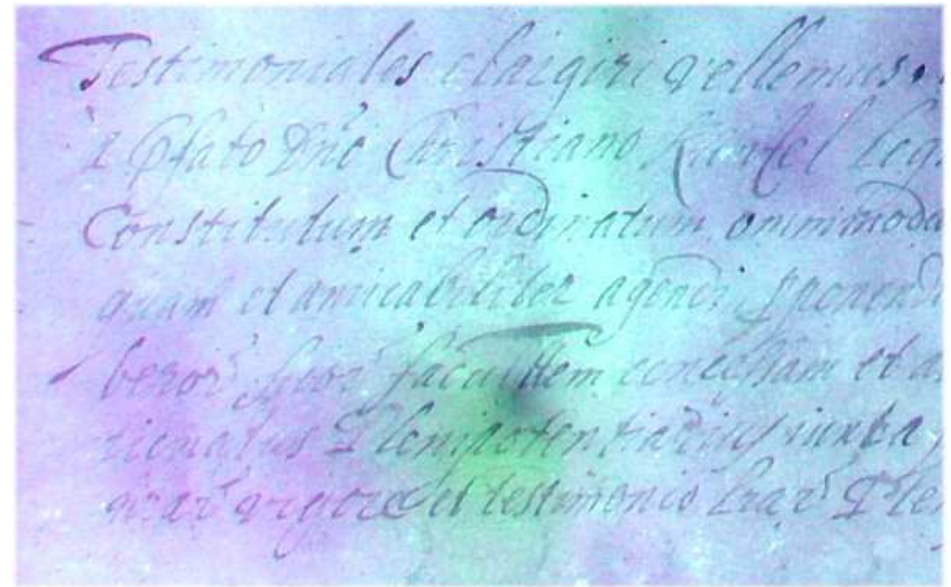
Záření v VIS nebo UV vede k excitaci elektronu v molekule/chromoforu ze základního stavu do excitovaného (Franck–Condonův princip).



Dynamika přechodu do excitovaného stavu v molekule je mnohem komplexnější, dva a více excitované stavy mohou interagovat mezi sebou (b).

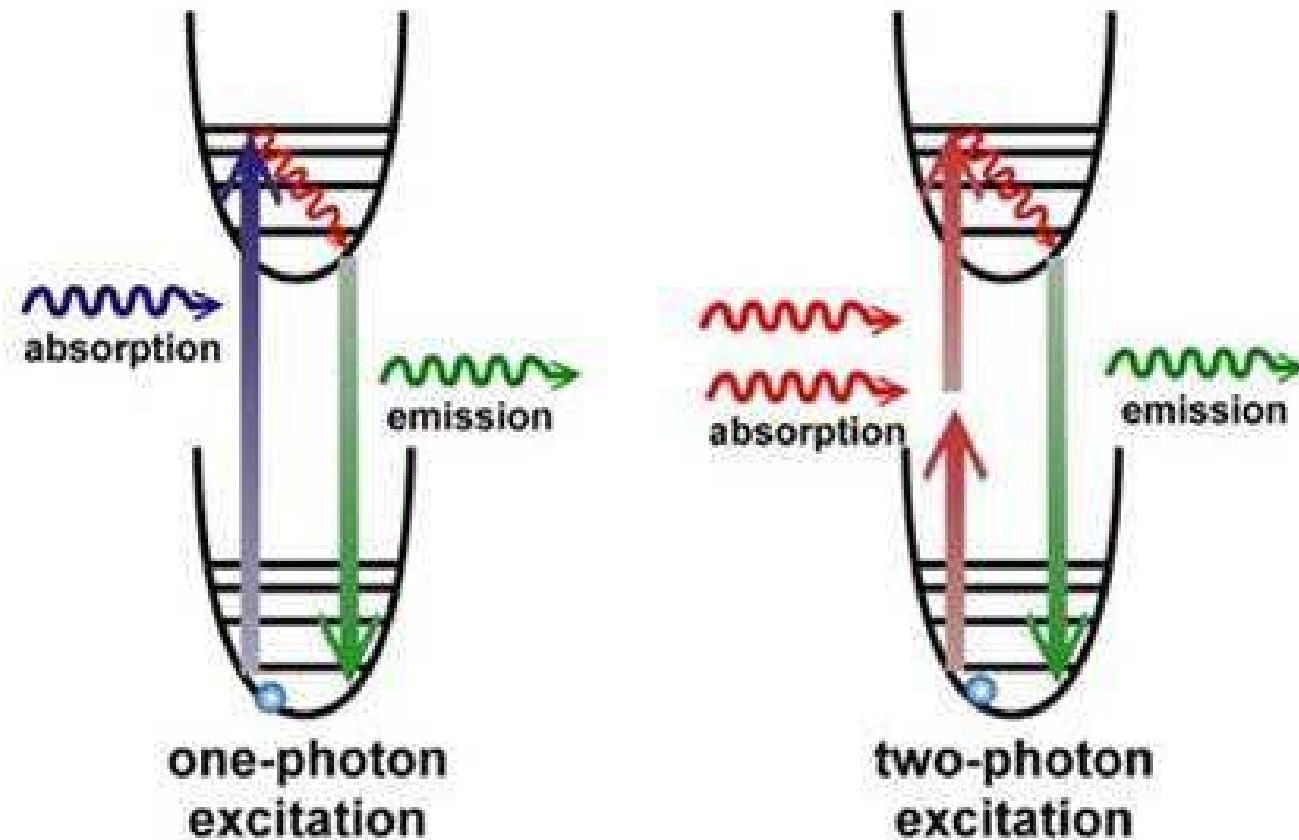
Fluorescence

Aplikace ultrafialové fluorescence - zviditelnění časem degradovaného textu



Multifotonová excitace

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



Odraz záření

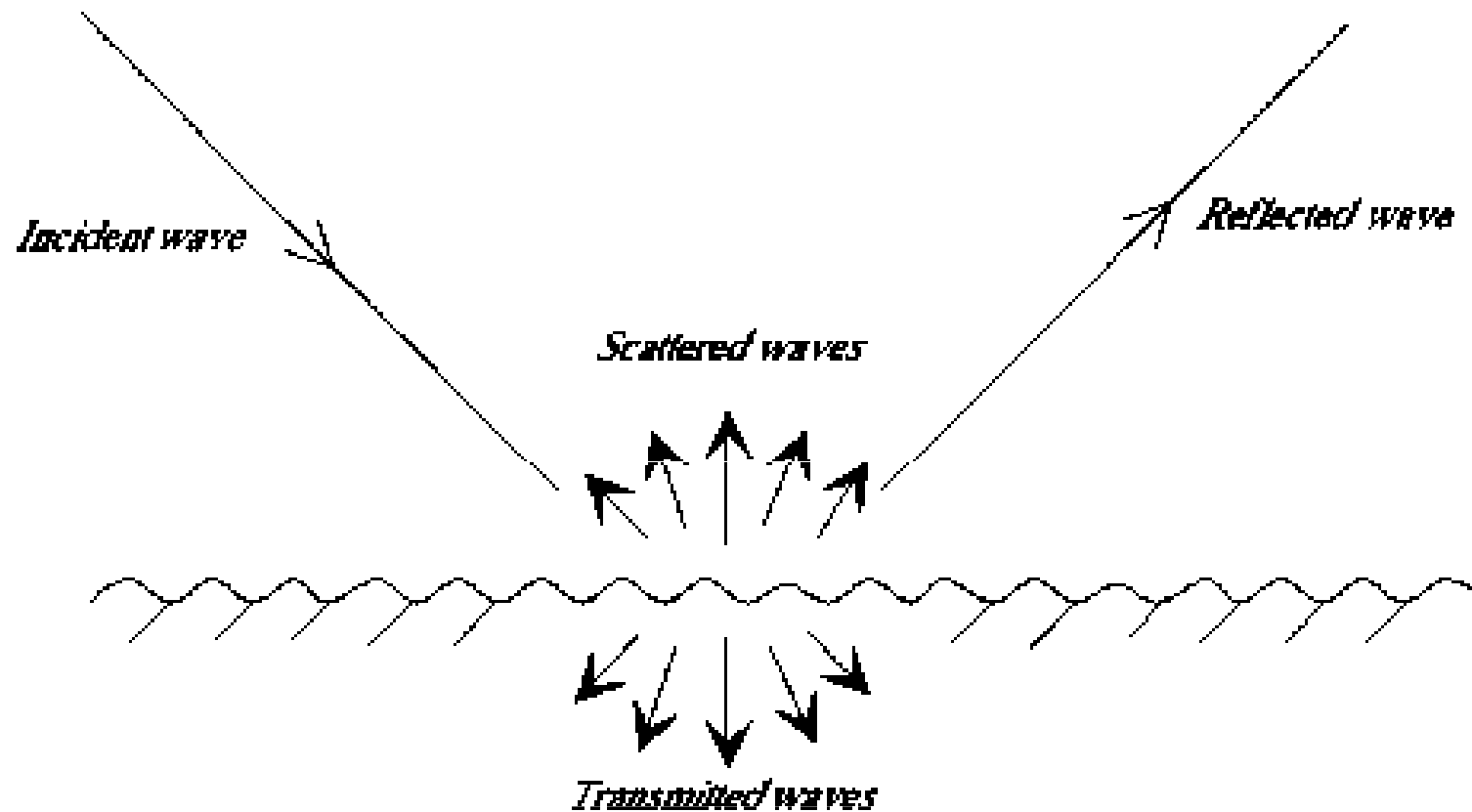


Figure 15. Case of natural environments: sum of specular reflection and diffuse reflection (volume reflection is ignored here).

Reflektografie

Aplikace infračervené reflektografie - zviditelnění podkresby



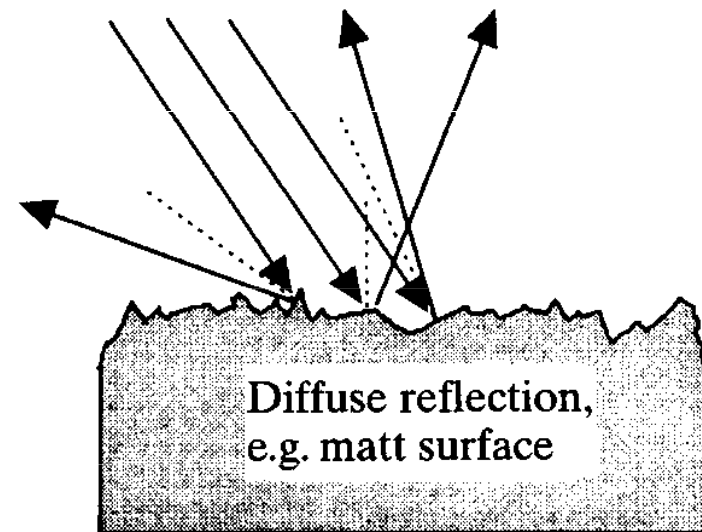
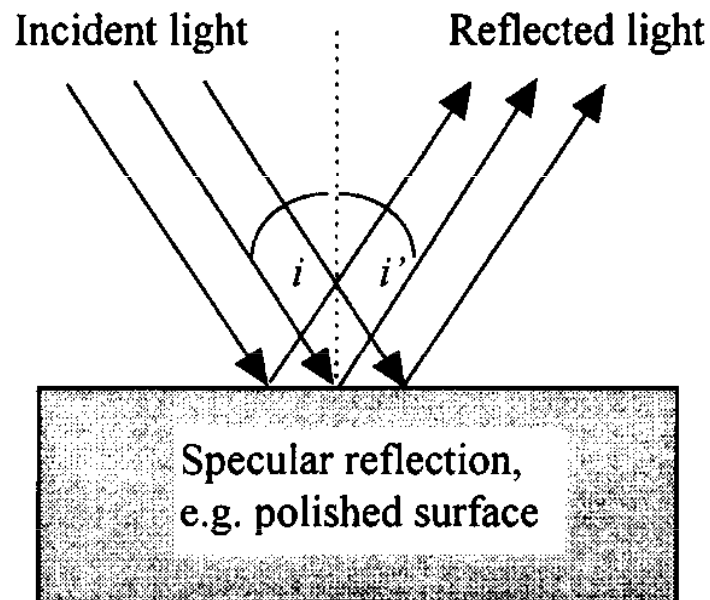
Reflektografie

Aplikace infračervené reflektografie - zviditelnění tetování na mumifikovaných rukou z pohřebiště Semna South, Núbie (dnešní Súdán), stáří cca 2000 let.



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'

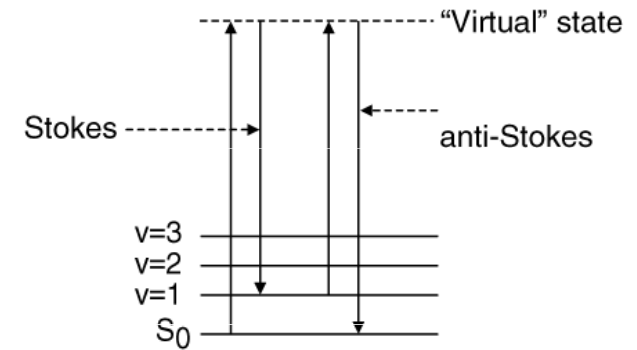
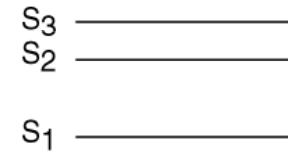
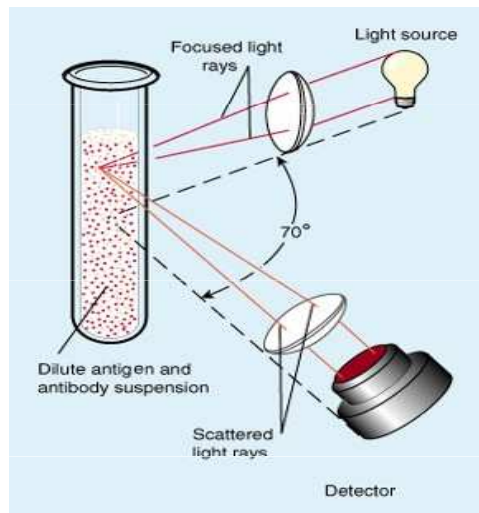
..... Denotes perpendicular to surface

Rozptyl

- Optický (Rayleighův)
- Ramanův

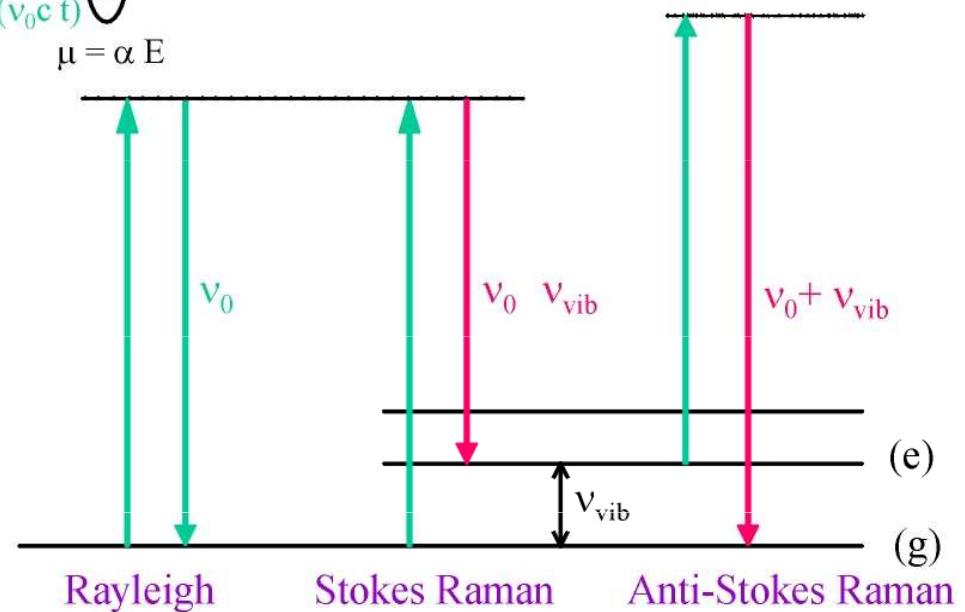
Ramanova spektrometrie

Nefelometrie

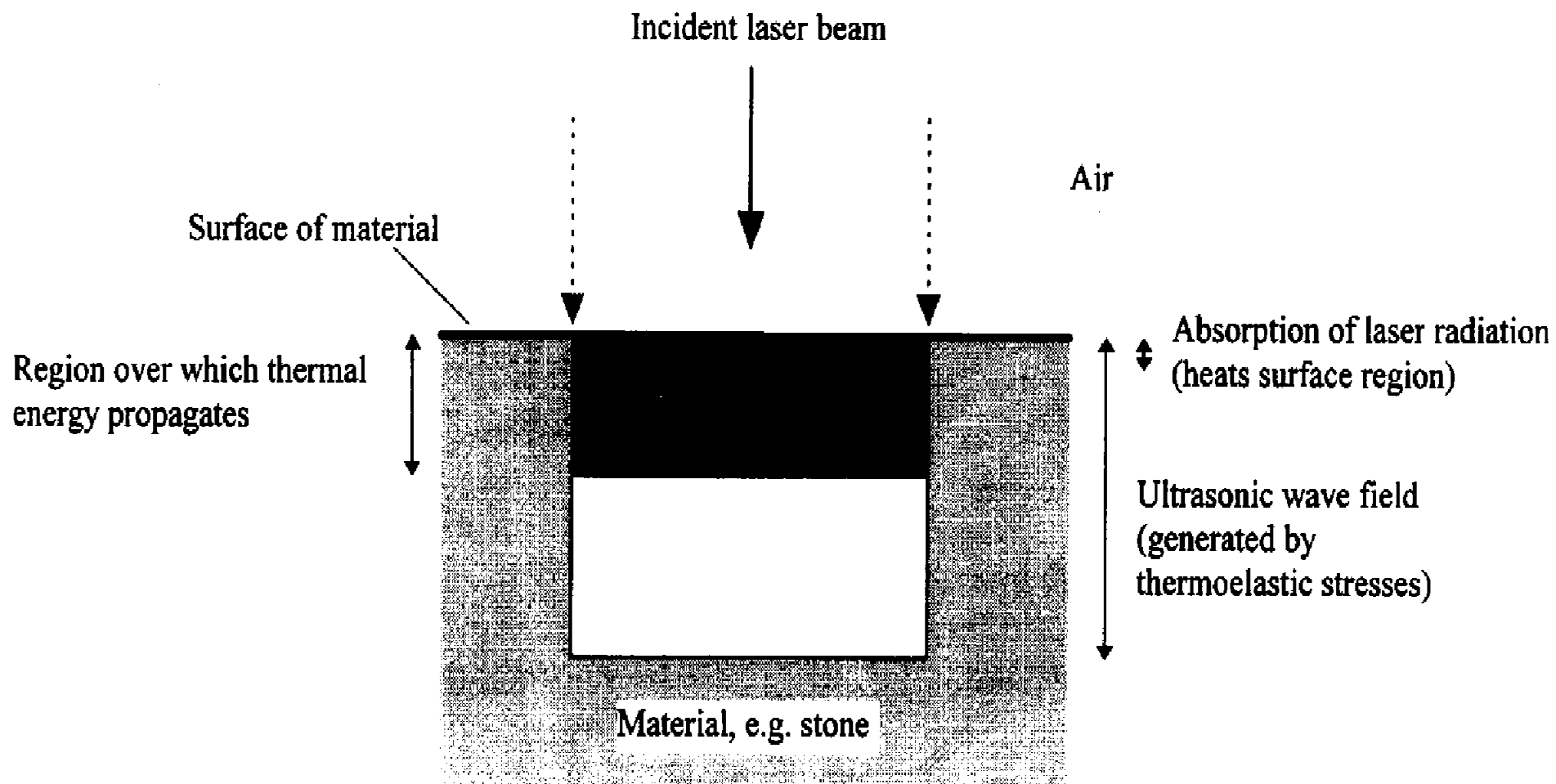


$$E = E_0 \sin(\nu_0 c t)$$

$$\mu = \alpha E$$



Procesy probíhající při absorpci laserového záření materiálem



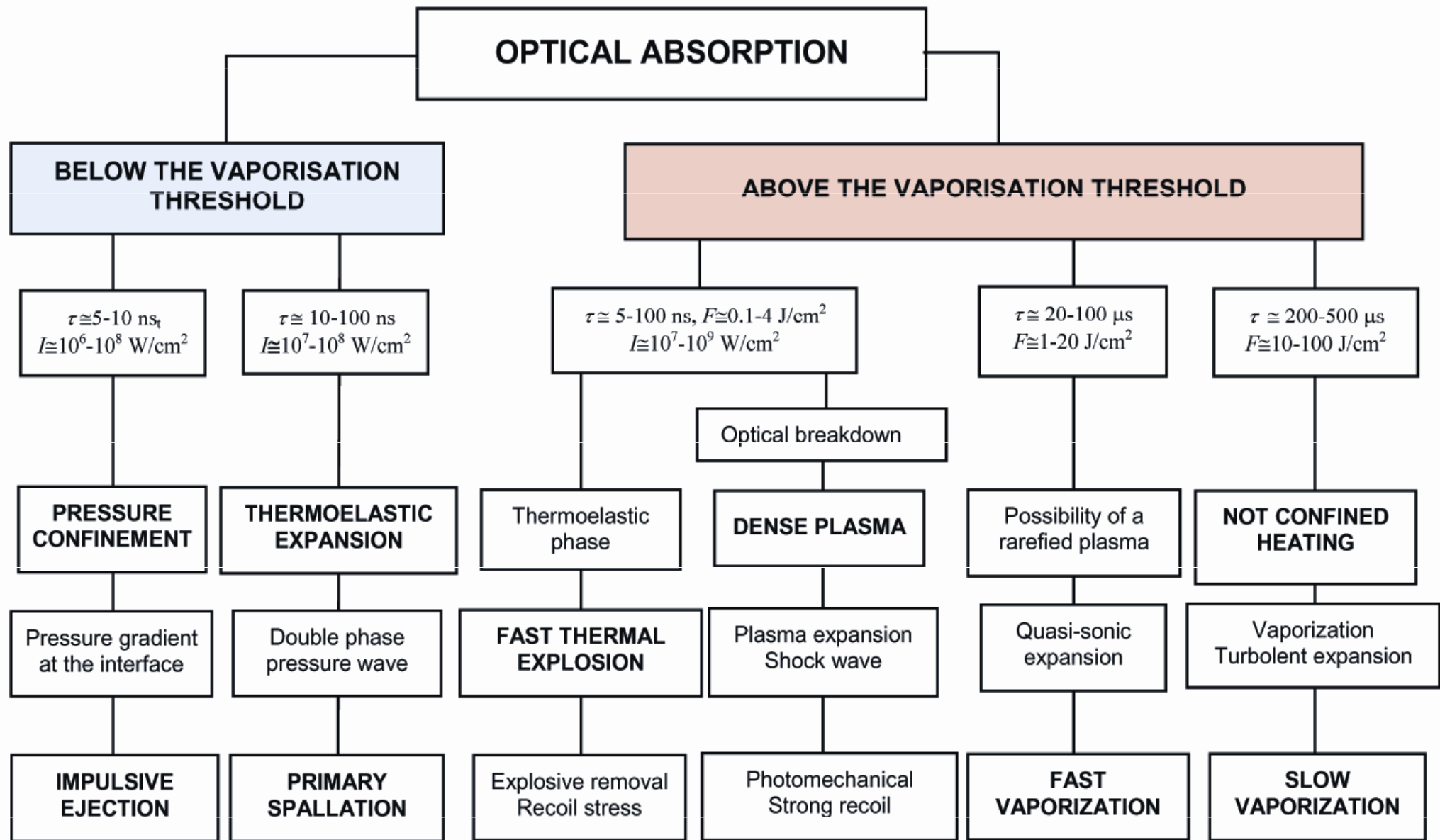
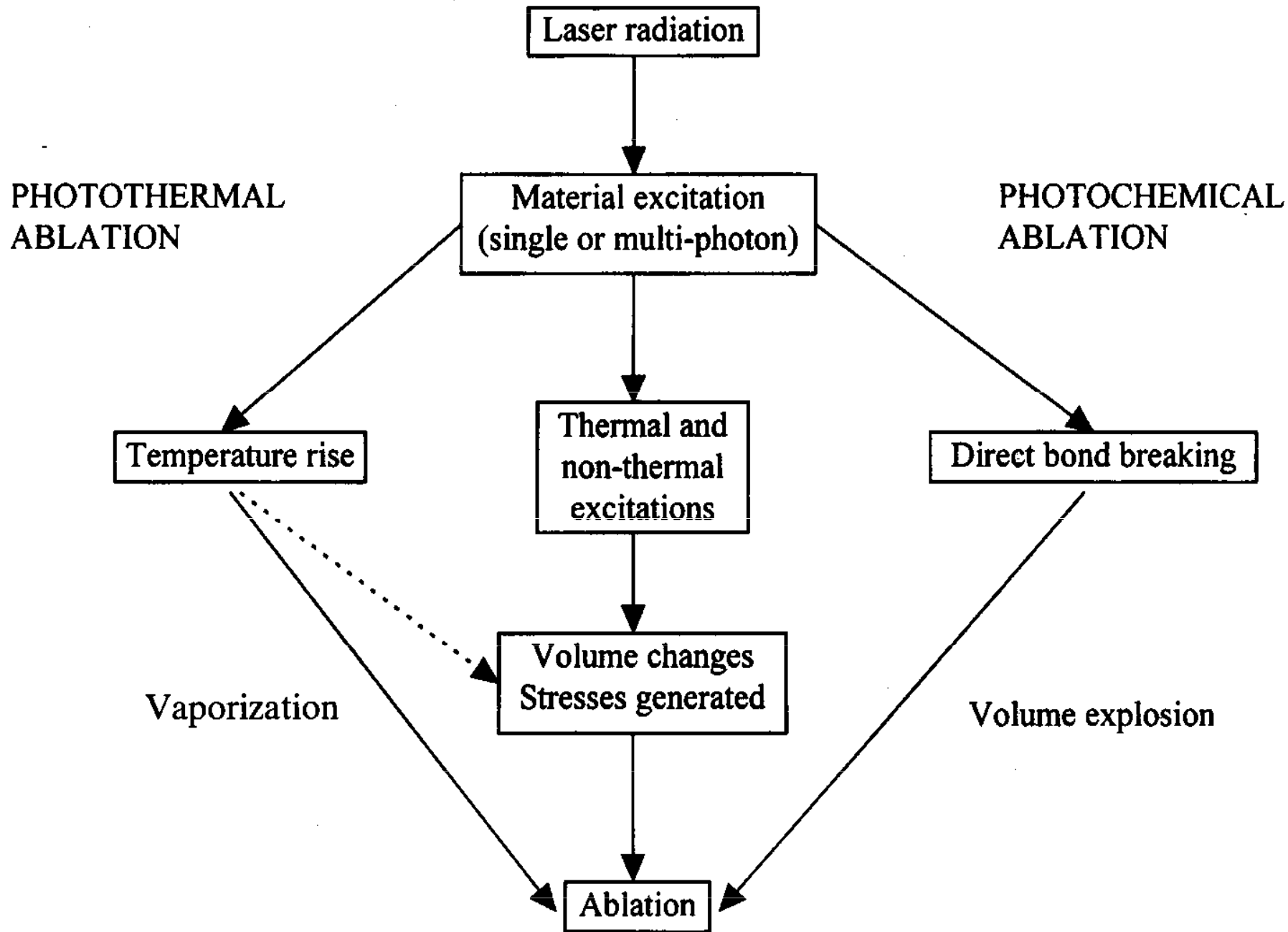


Fig. 2.1.7: Laser ablation channels for homogeneous absorbing materials. Pulse durations correspond to the one of the commercial laser systems. Fluences and intensities are roughly estimated, they only indicate orders of magnitude.



Fotochemická interakce

se uplatňuje při nízkých hustotách výkonu laserového záření. Dochází zde k chemickým reakcím na makromolekulární úrovni.

- Hlavní idea:
selektivní fotochemické 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

Fotoablace

dochází k přímému rozpadu molekulárních vazeb pomocí vysoce energetických fotonů UV záření např. u pulsních excimerových laserů.

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

Mechanismus UV fotoablace

Absorpce UV fotonů



dosažení repulsivních
excitovaných stavů



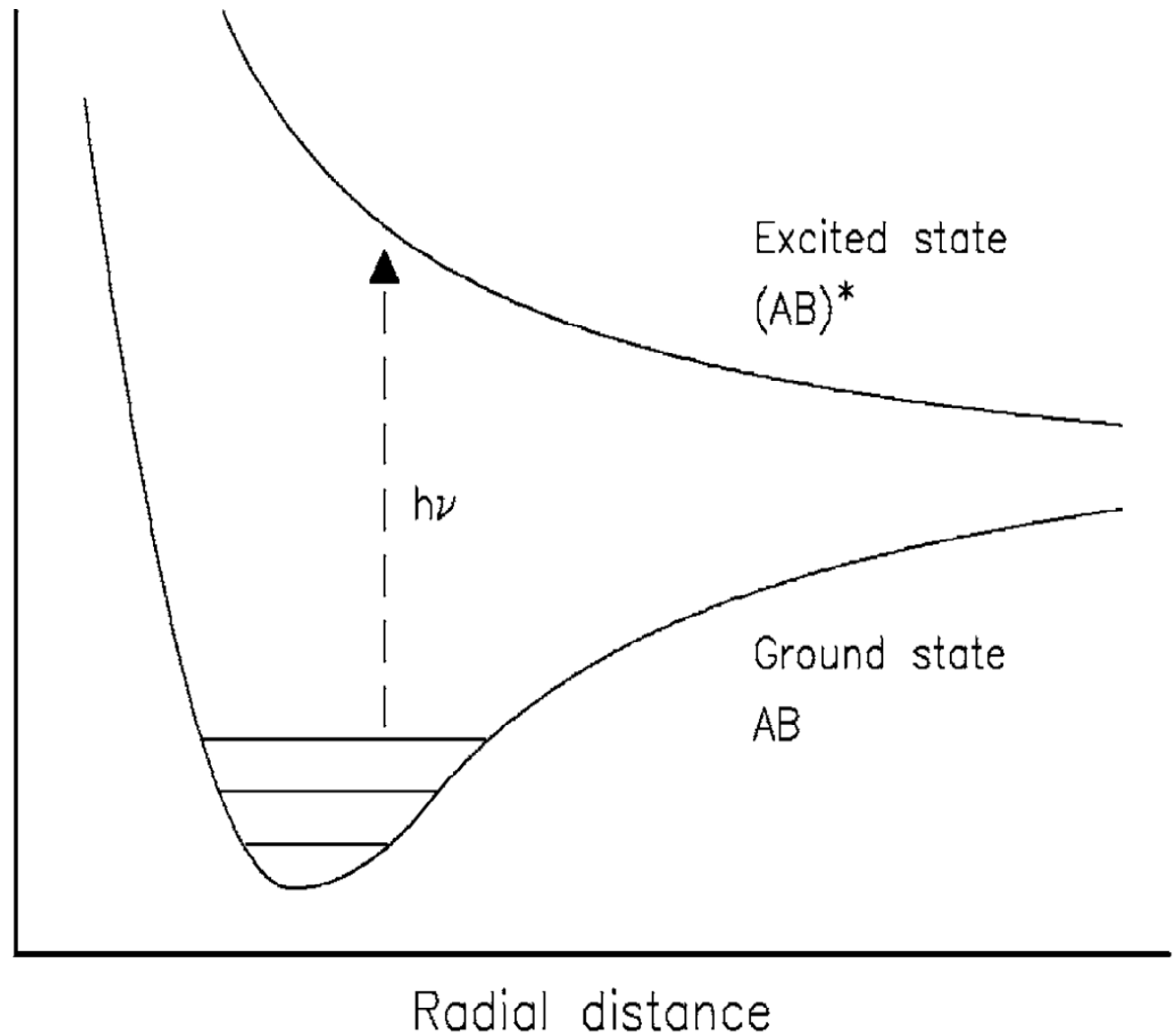
Disociace



Ejekce fragmentů



Ablace



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

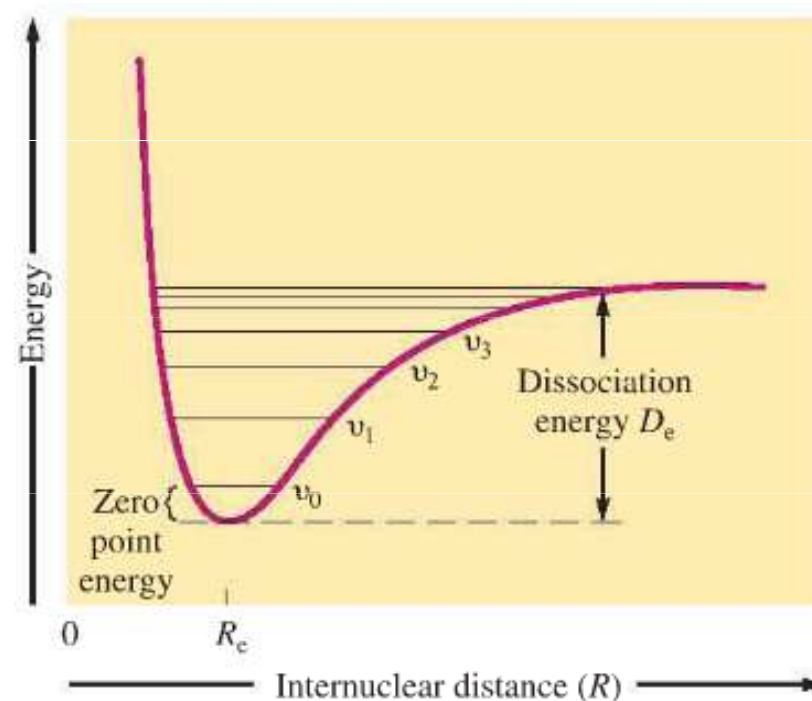
$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

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

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



Vlnové délky a energie fotonů pro různé typy laserů

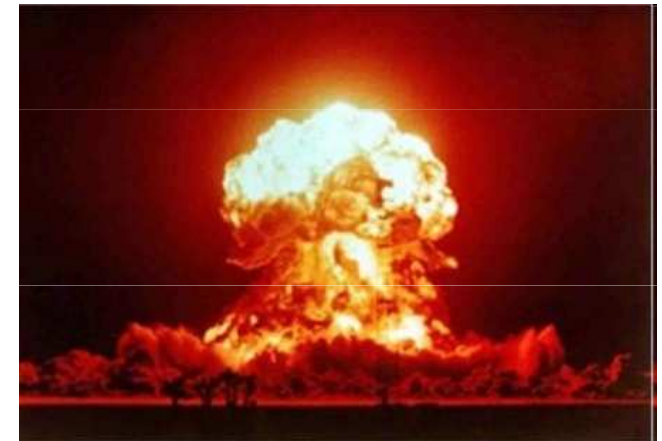
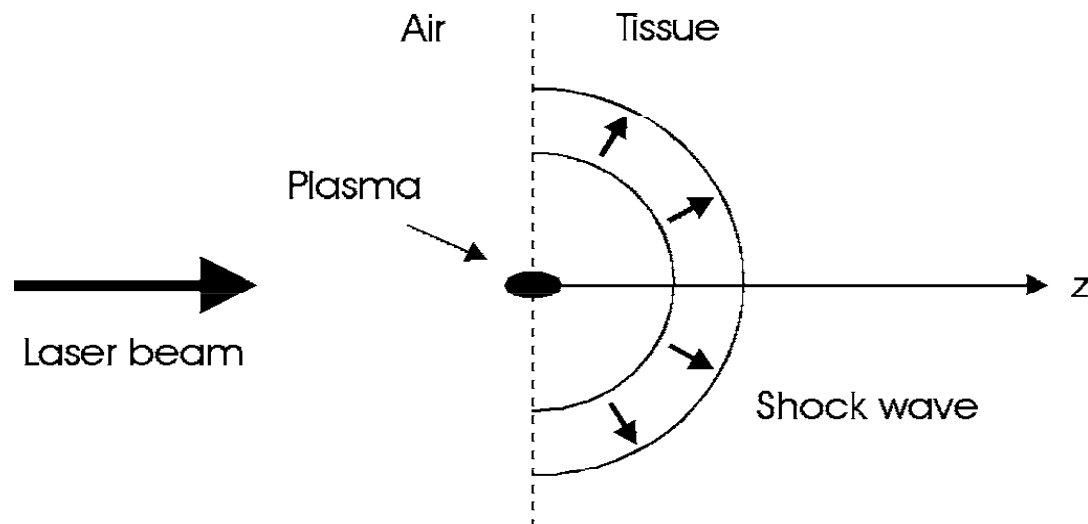
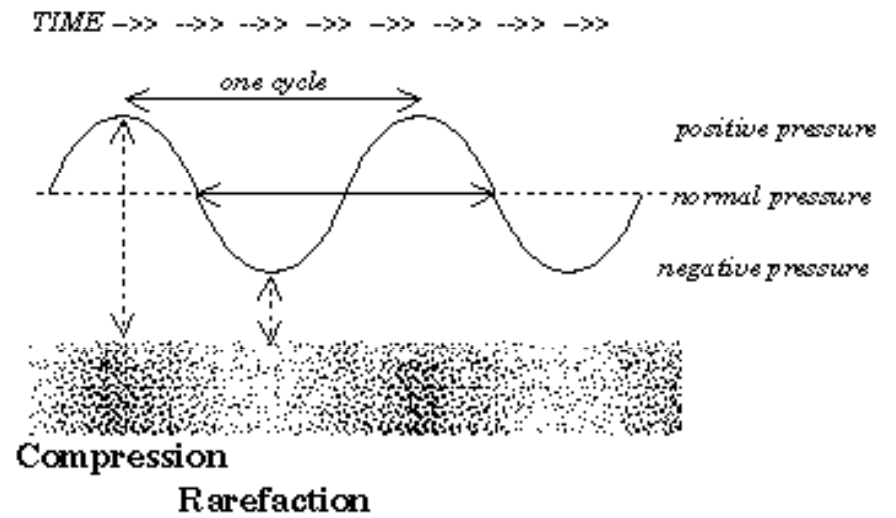
<i>Laser type</i>	<i>Wavelength (nm)</i>	<i>Photon energy (eV)</i>
ArF	193	6.4
KrF	248	5.0
Nd:YLF (4 ω)	263	4.7
XeCl	308	4.0
XeF	351	3.5
Argon ion	514	2.4
Nd:YLF (2 ω)	526.5	2.4
He-Ne	633	2.0
Diode	800	1.6
Nd:YLF	1053	1.2
Nd:YAG	1064	1.2
Ho:YAG	2120	0.6
Er:YAG	2940	0.4
CO ₂	10600	0.1

Fotodisrupce

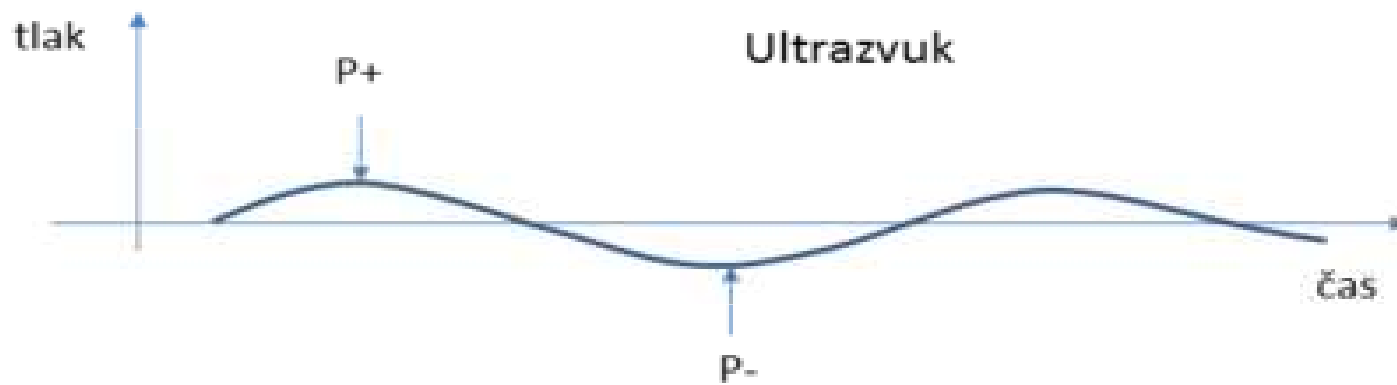
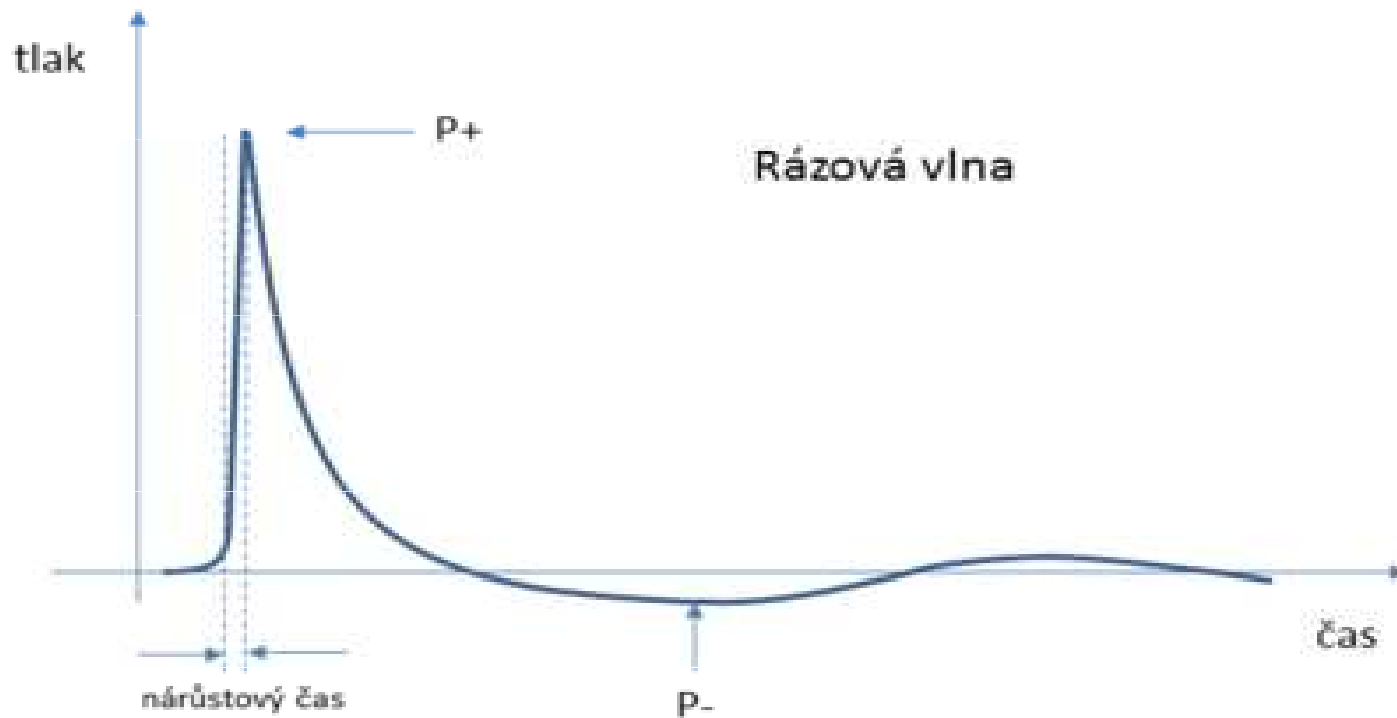
využívá hlavně mechanický efekt: laser vytváří miniaturní bleskový výboj provázený mechanickým i akustickým výbojem.

- 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



Mechanismus šíření rázové tlakové i ultrazvukové vlny je zhuštění a zředění prostředí.



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 μ s . . . 1min, hlavně u kontinuálních laserů
- Typická hustota výkonu:
10 . . . 10⁶ W/cm²
- Speciální aplikace (různá kombinace expoziční doby a plošné hustoty výkonu) :
koagulace, odpařování, tavení, tepelný rozklad

Termomechanické změny

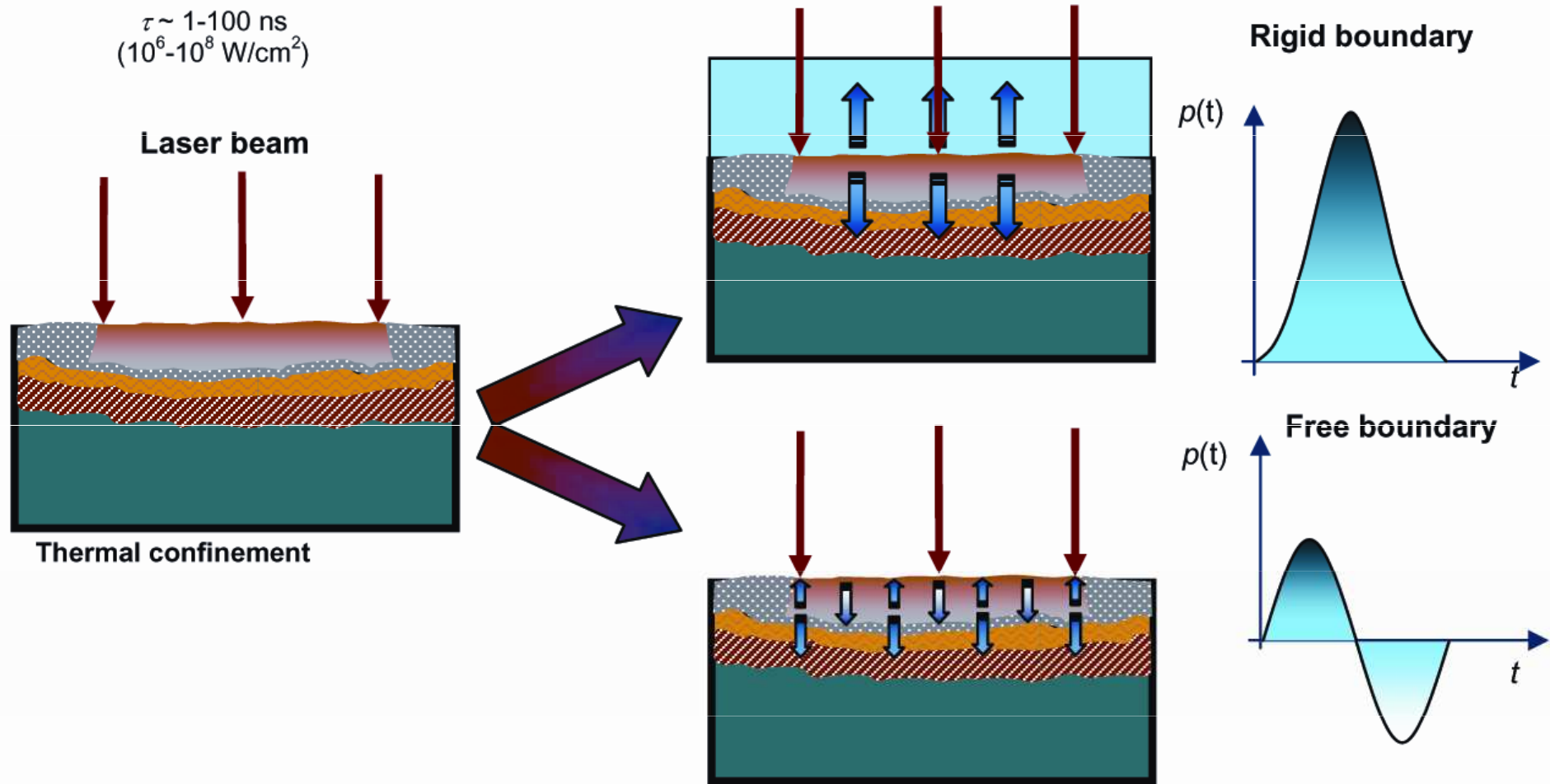


Fig. 2.1.6: Schematic representation of the thermoelastic generation in absorbing materials. The rigid boundary condition is realised when the stratification is irradiated through a transparent liquid or solid.

Ablace indukovaná plazmatem

vzniká plazma, které samo absorbuje záření a dochází tak expanzi a kolapsu plazmatického obláčku a k následným rázovým vlnám.

- Hlavní idea :
 ablace vznikem plazmatu
- Pozorování:
 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

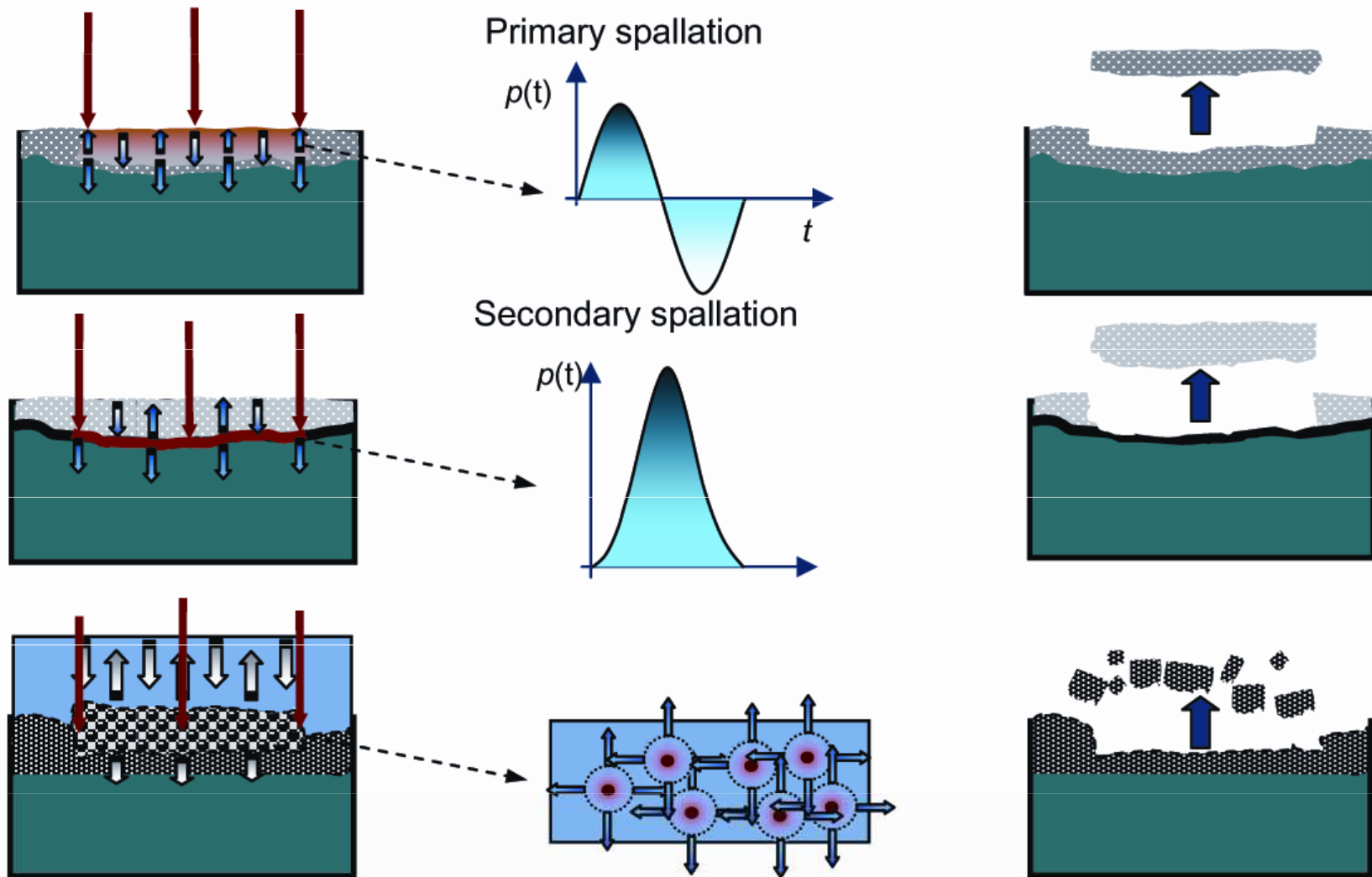
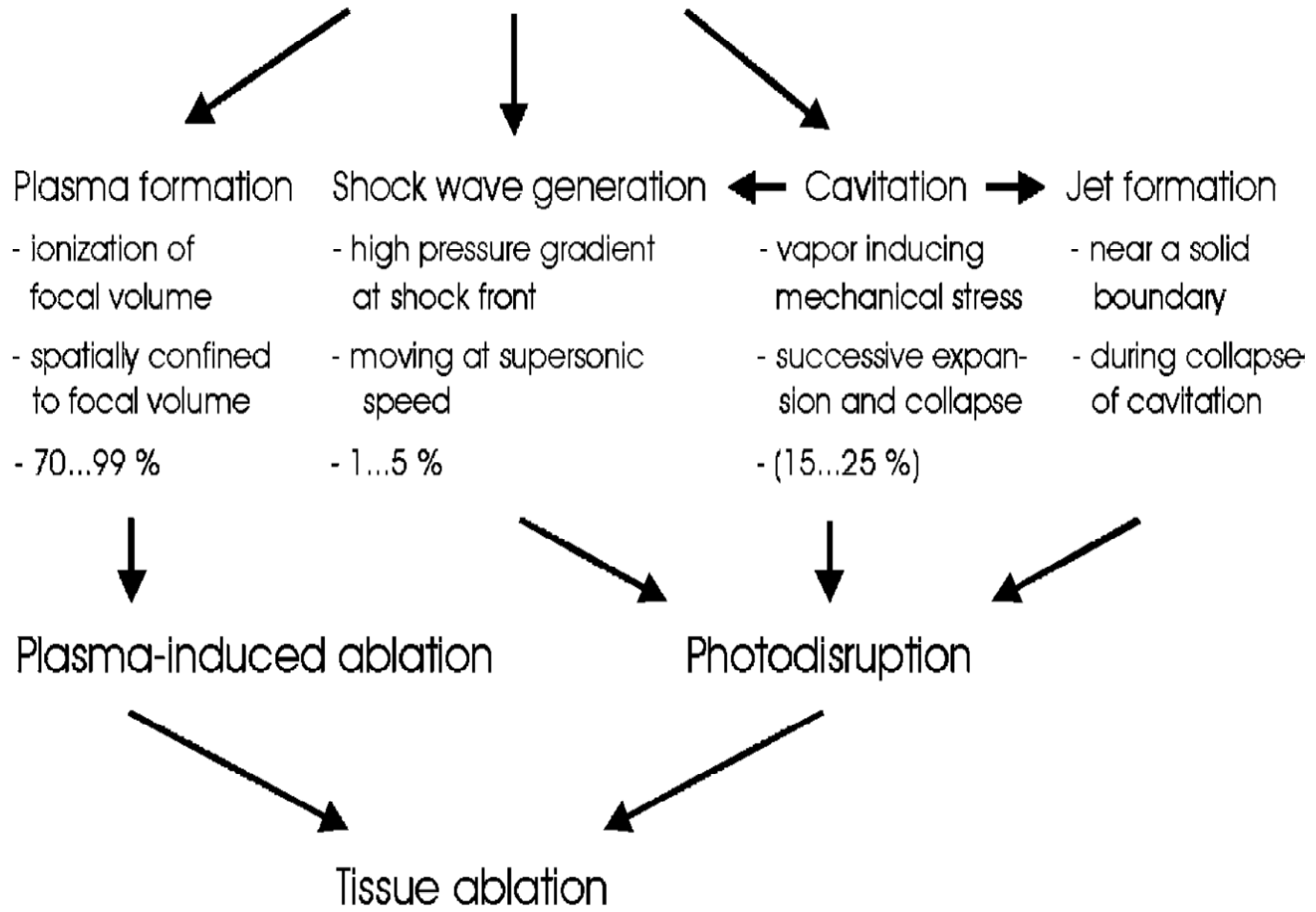
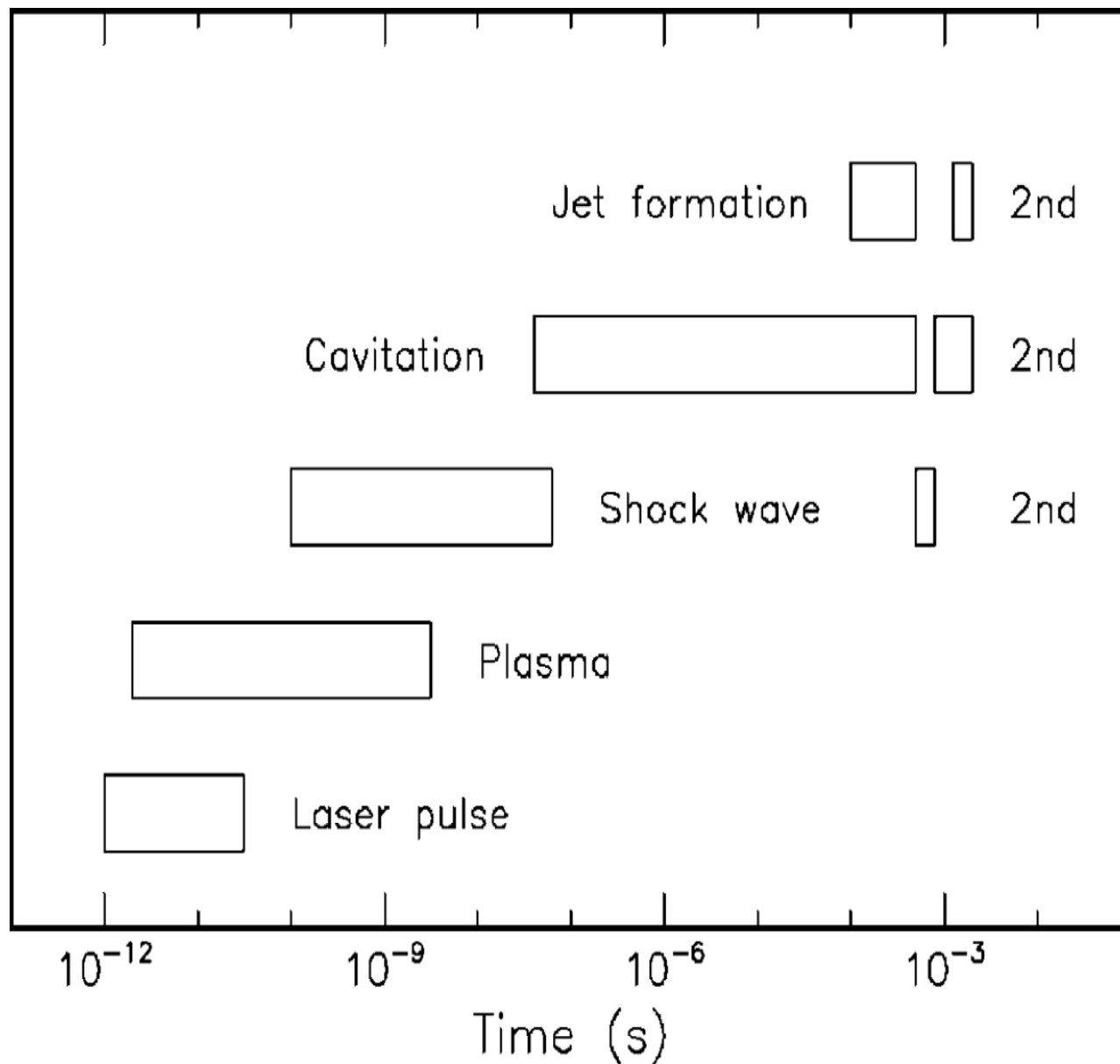


Fig. 2.1.8: Representation of possible spallation mechanisms. Primary spallation: produced by rarefaction peak. Secondary spallation: produced by laser heating and subsequent pressure development in proximity of the interface between two adjacent layers. Water-mediated spallation: similar to primary spallation, where water plays an important role in photomechanical and pressure wave propagation. A relatively strong fragmentation effect is expected in this latter case.

Optical breakdown





Přibližná doba trvání procesů přispívajících k fotodisrupci. Předpokládá se 30 ps laserový puls.

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.

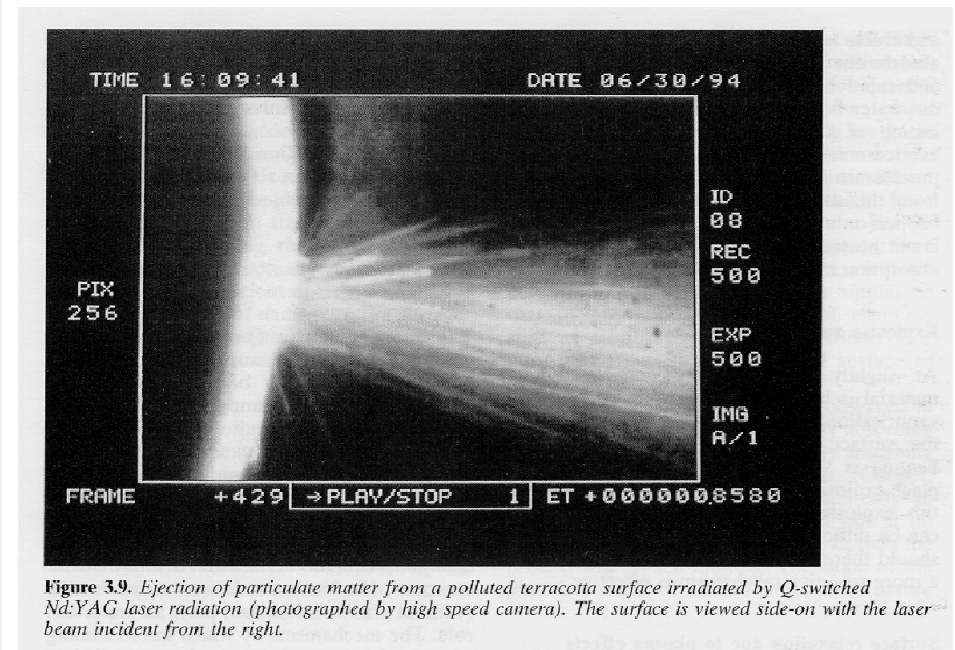
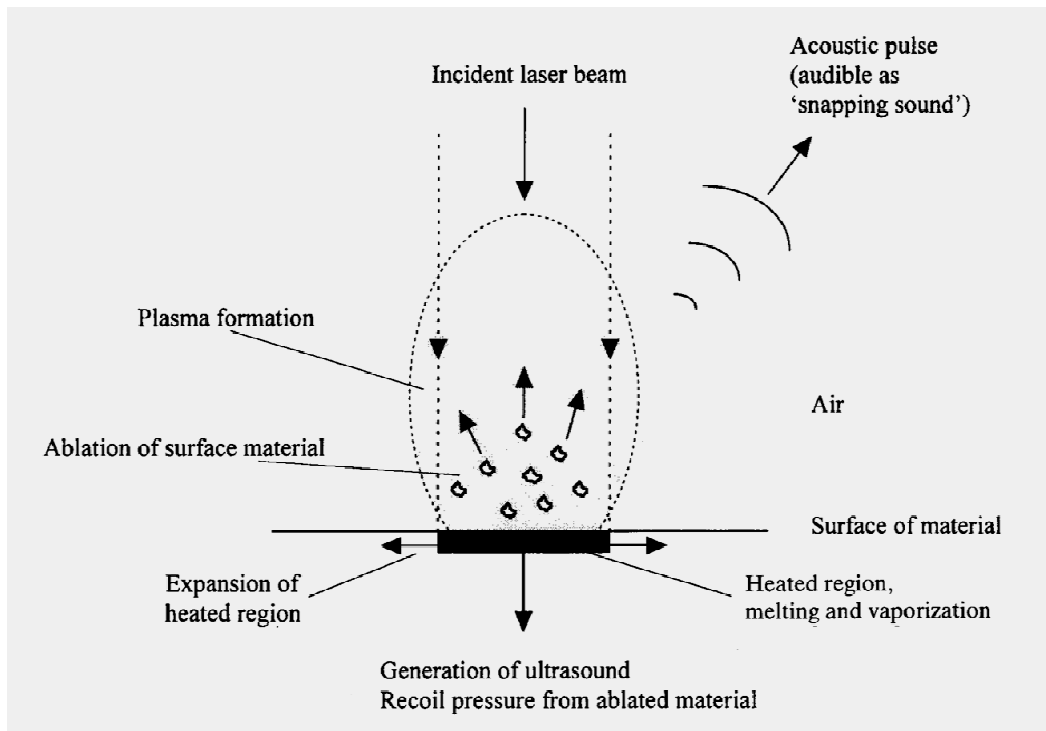
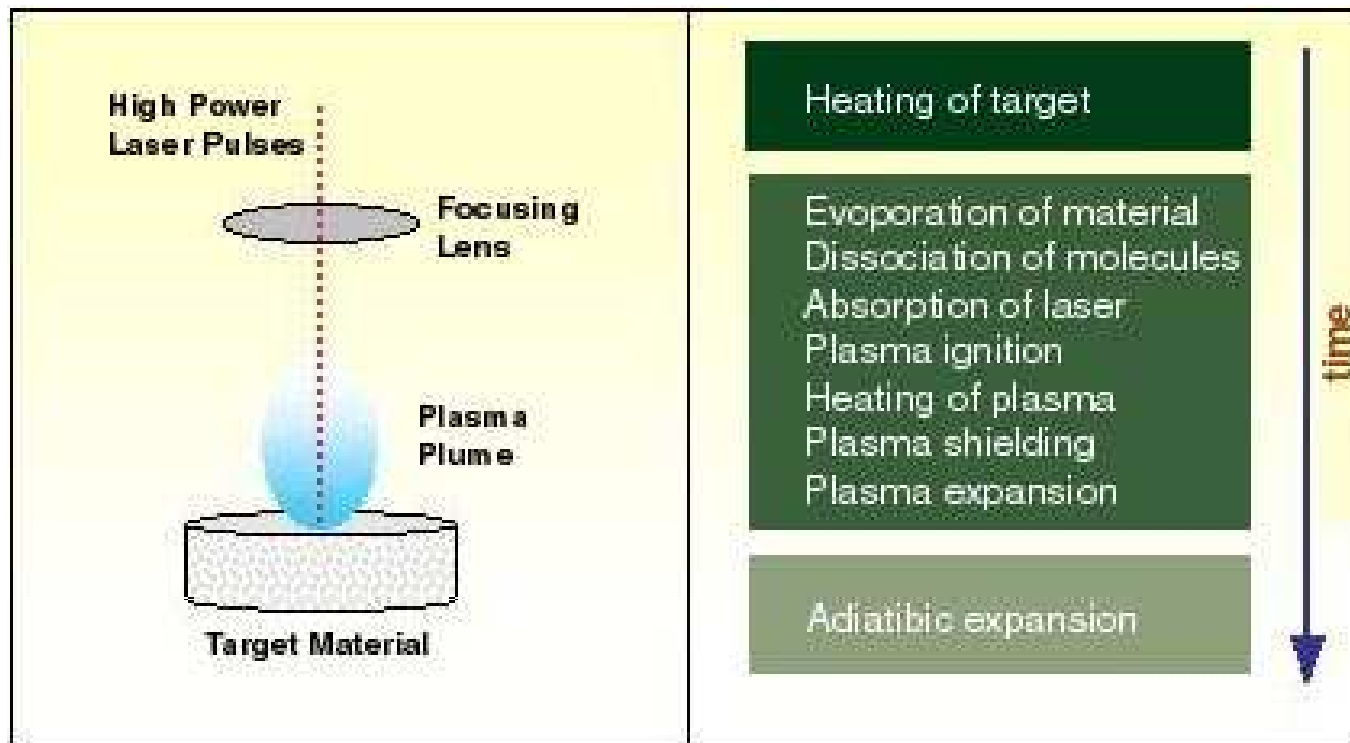


Figure 3.9. Ejection of particulate matter from a polluted terracotta surface irradiated by Q-switched Nd:YAG laser radiation (photographed by high speed camera). The surface is viewed side-on with the laser beam incident from the right.



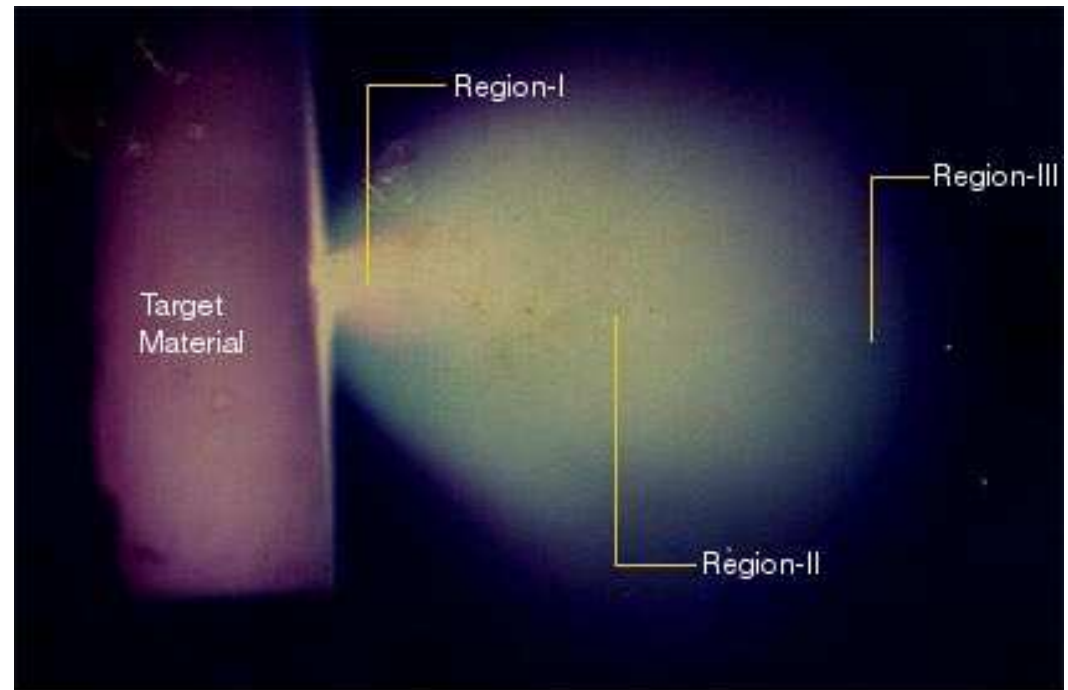
Evolution of laser induced plasma from a target material

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 dissipuje.

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 pulsu

Důsledkem rázové vlny je i vznik akustického pulsu:

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).

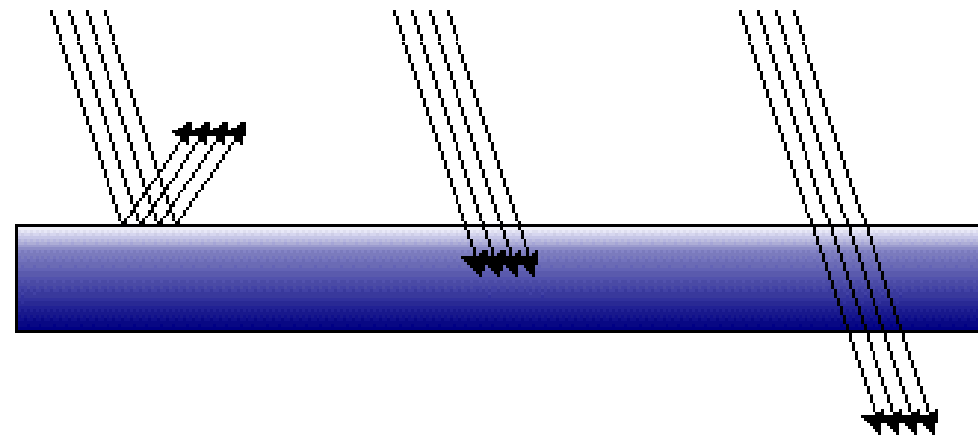
Při ***velmi vysokých hustotách výkonu*** vzniklé plazma generuje šokové pulsy. amplituda akustické vlny generované ve vzduchu v důsledku absorpce laserového záření je závislý na interakci mezi pulsem a povrchem.

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

$$Q_{PR} = 2$$

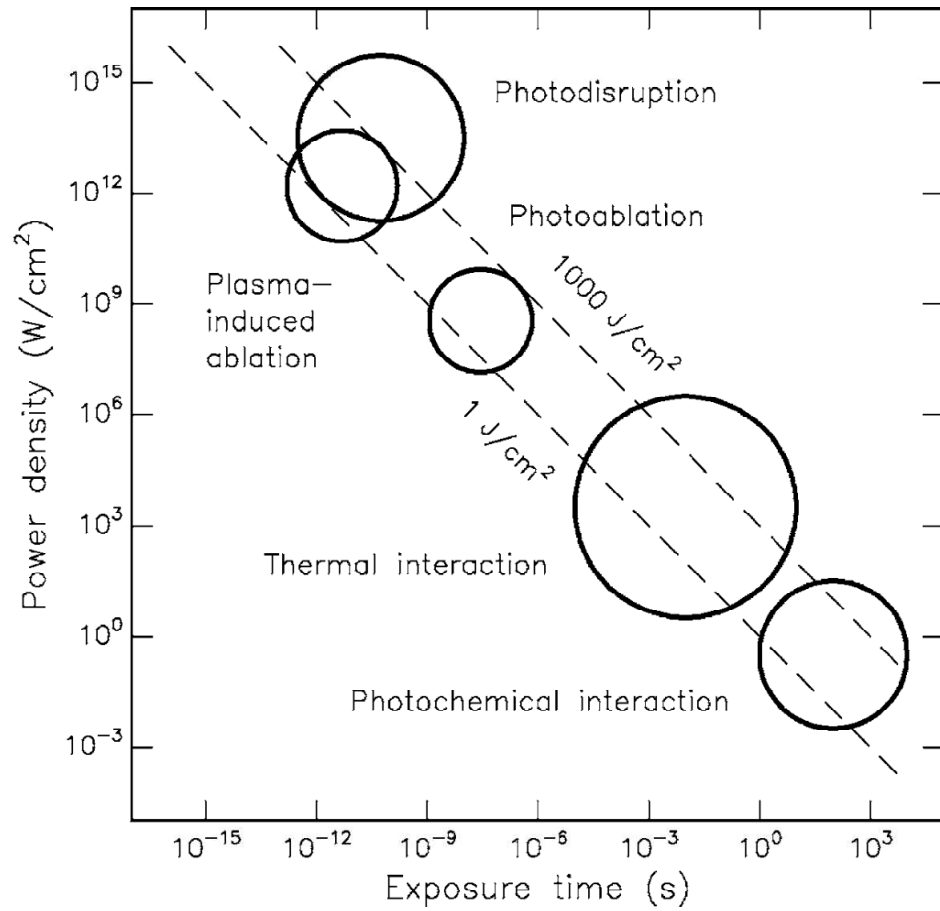
Total Absorption

$$Q_{PR} = 1$$

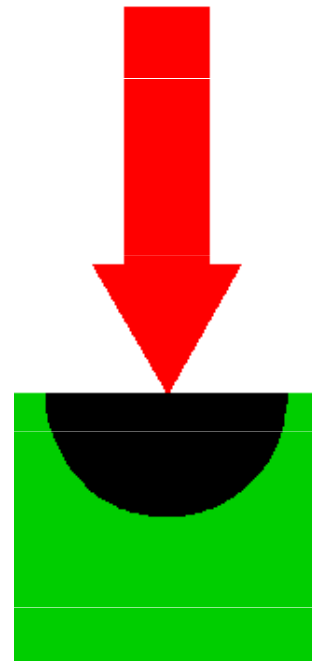
Total Transmission

$$Q_{PR} = 0$$

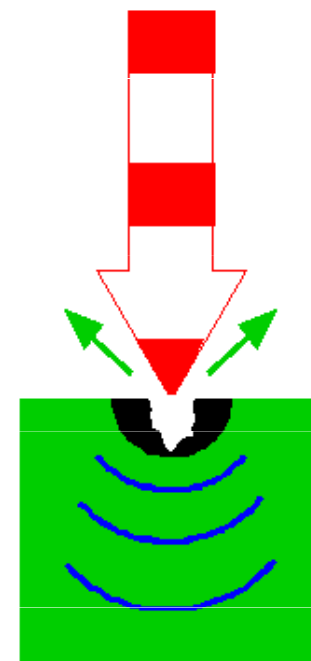
Délka pulsu



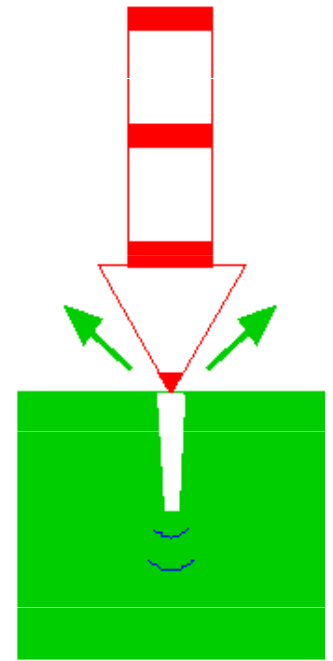
c.w. laser



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.

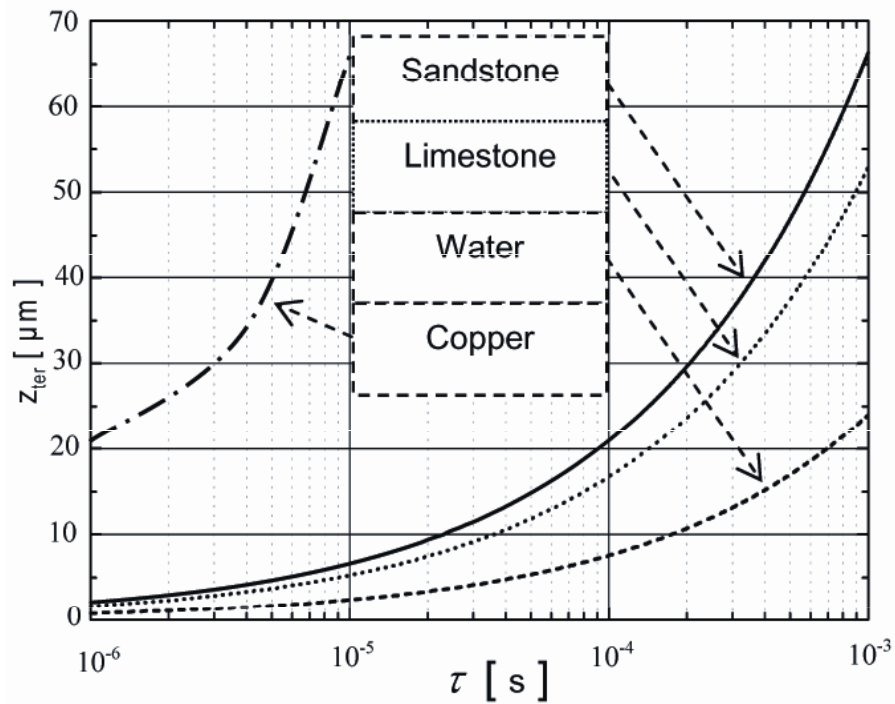


Fig. 2.1.5: Thermal diffusion length as a function of the pulse duration.

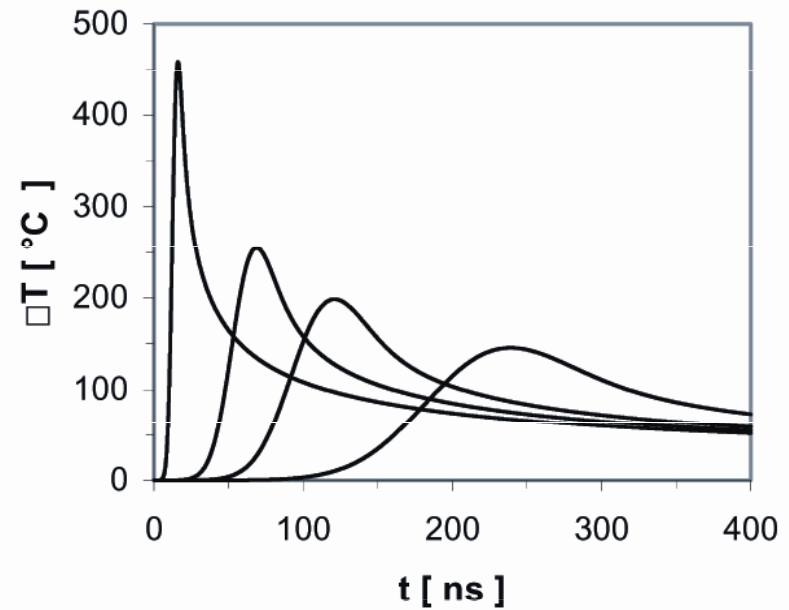
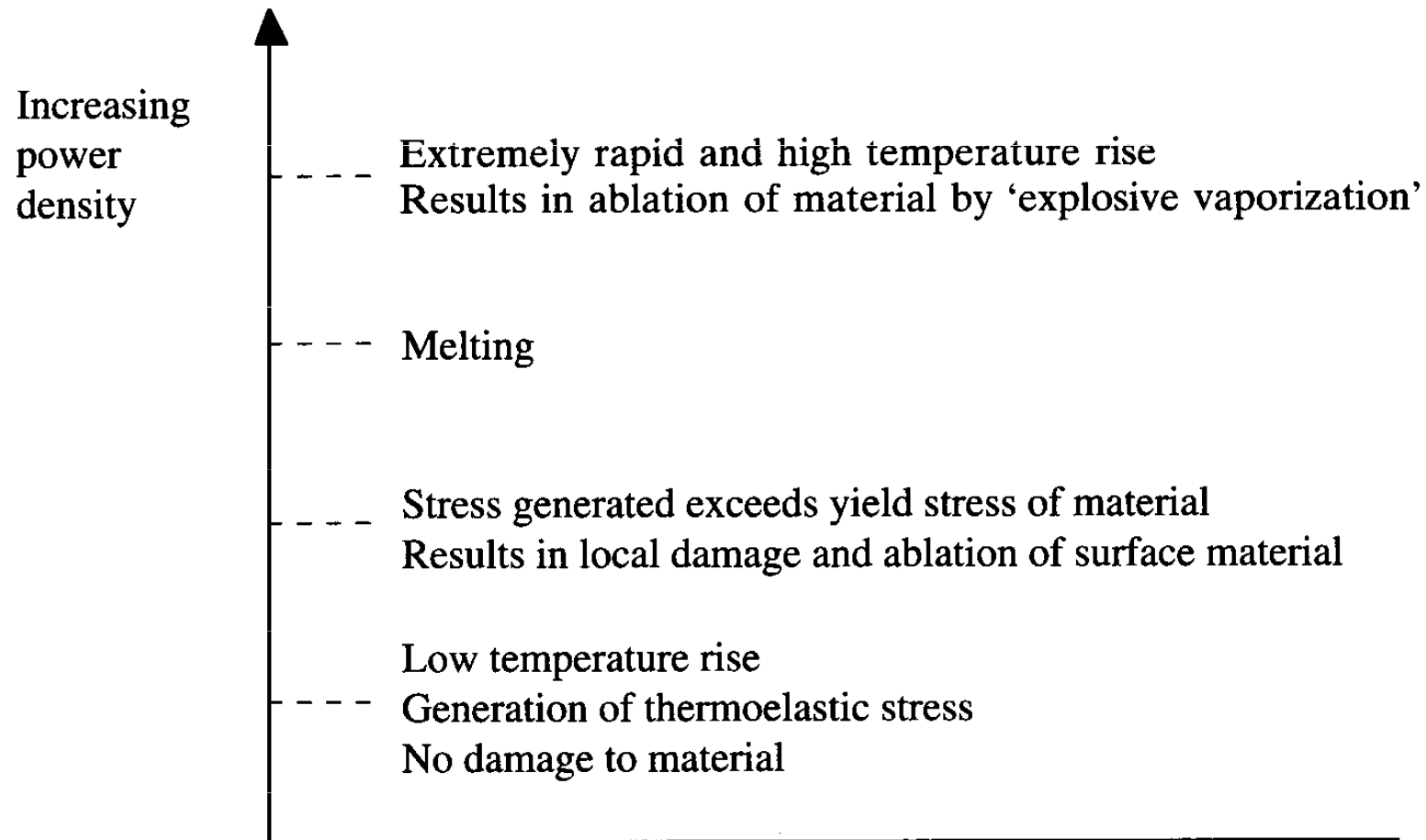


Fig. 2.1.4: Examples of temperature transients associated with Gaussian pulses of different duration.

Vliv hustoty výkonu

Hustota výkonu = výkon působící na jednotku plochy paprsku



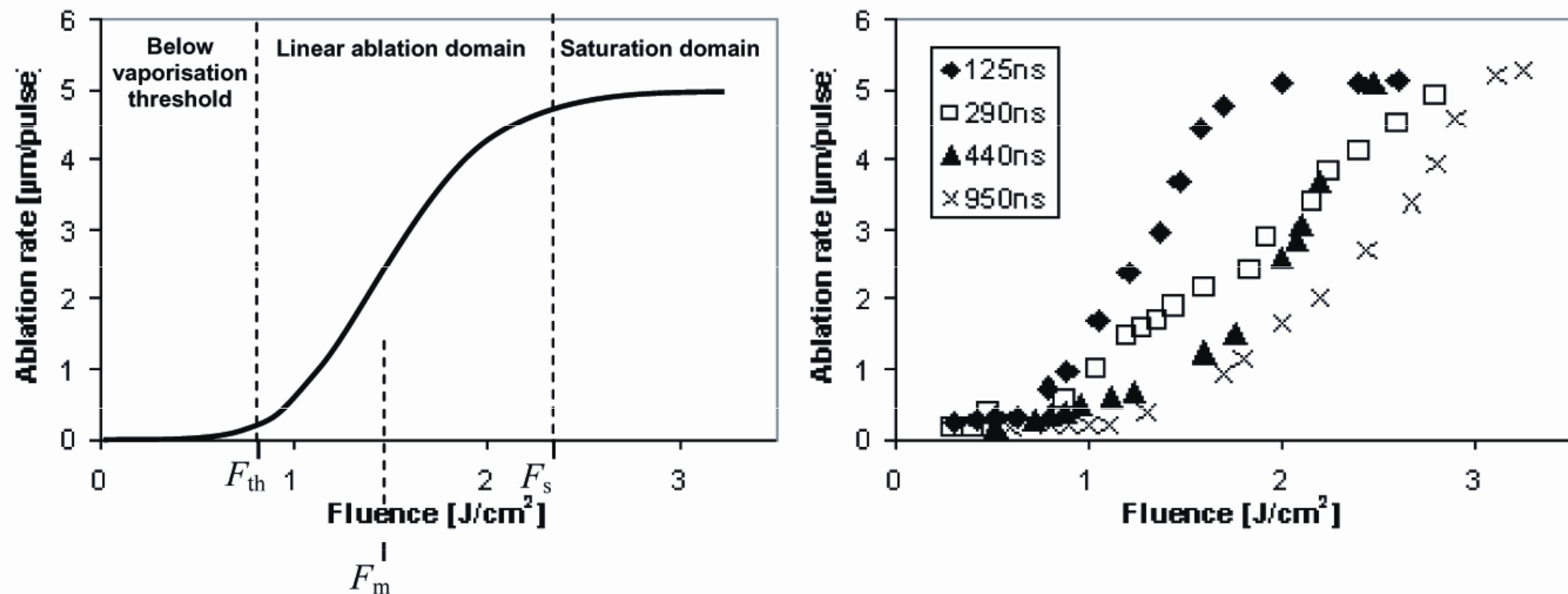


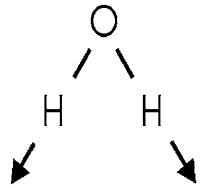
Fig. 2.1.9: Ablation rate for vaporisation-mediated removal; left) general behaviour; right) experimental data achieved for laser ablation of black crust standards using different pulse duration between 125-950 ns (SFR Nd:YAG laser).

Interakce laserového záření s kapalinami

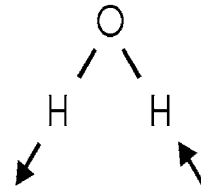


Absorpce vody

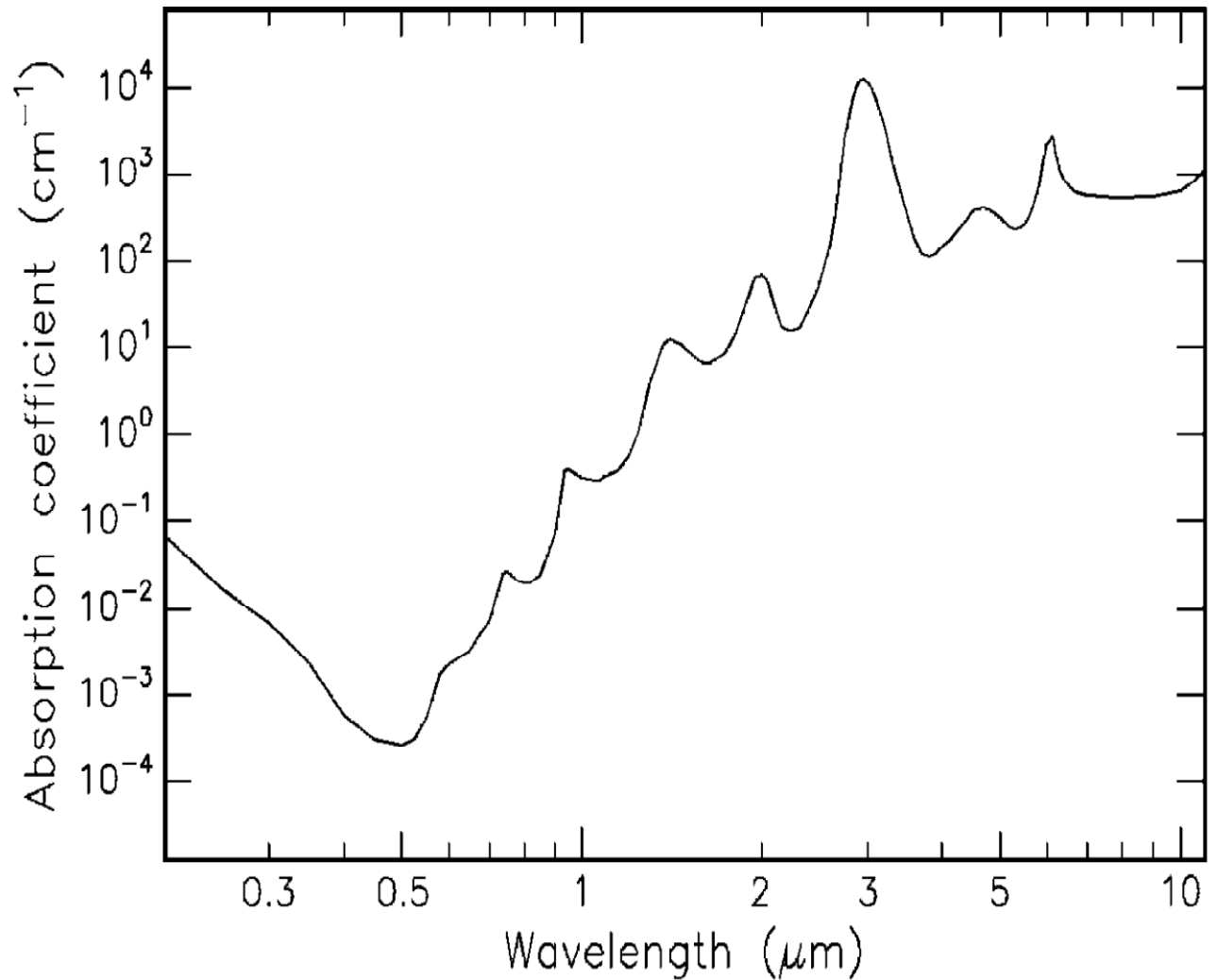
Symmetric vibration
(1.08×10^{14} Hz)



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



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



Absorpční koeficienty α a absorpční délky L vody pro různé vlnové délky.

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

„Suchá“ a „mokrá“ ablace

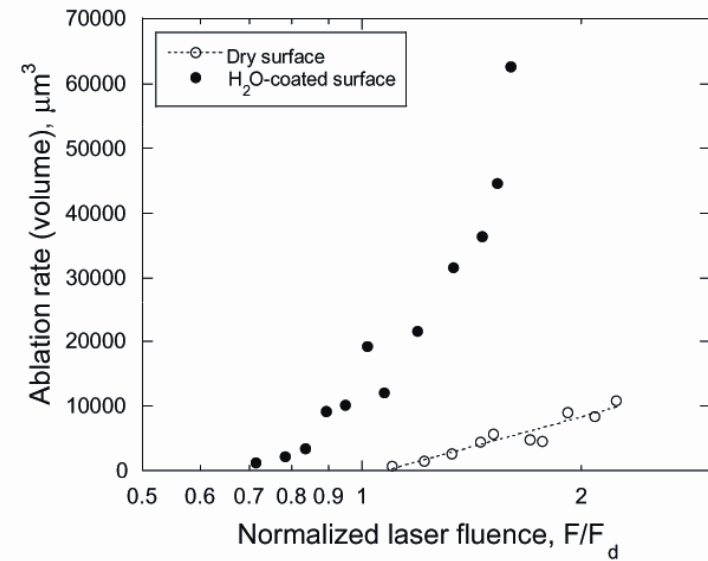


Fig. 4. Ablation rate of dry and liquid-coated Al surfaces (100 μm -thick foil) as a function of laser fluence normalized by the ablation

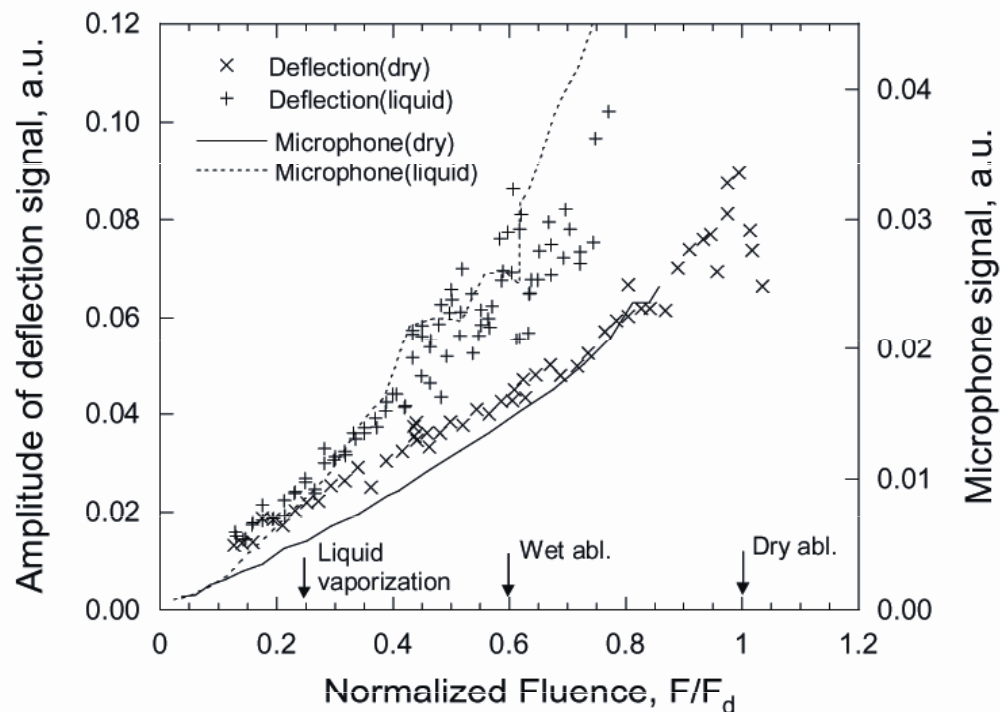
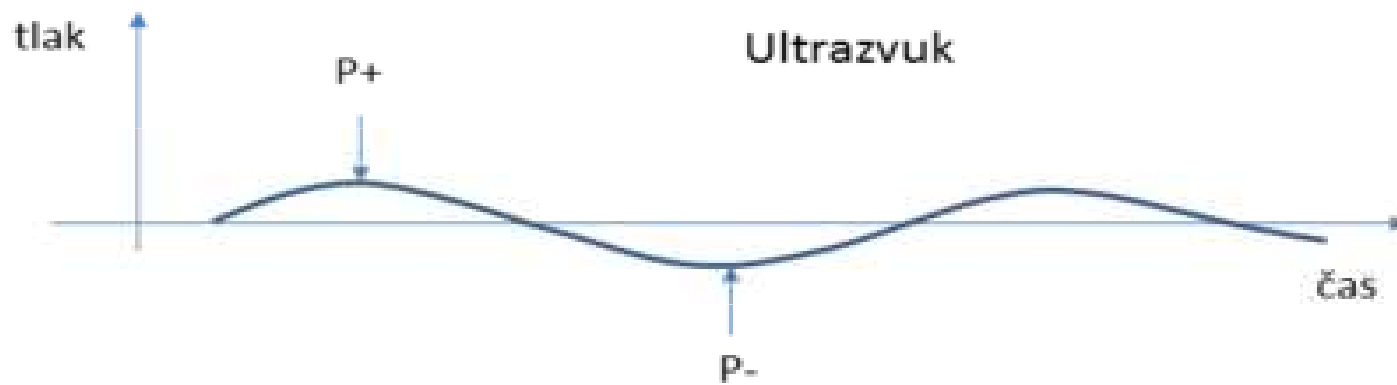
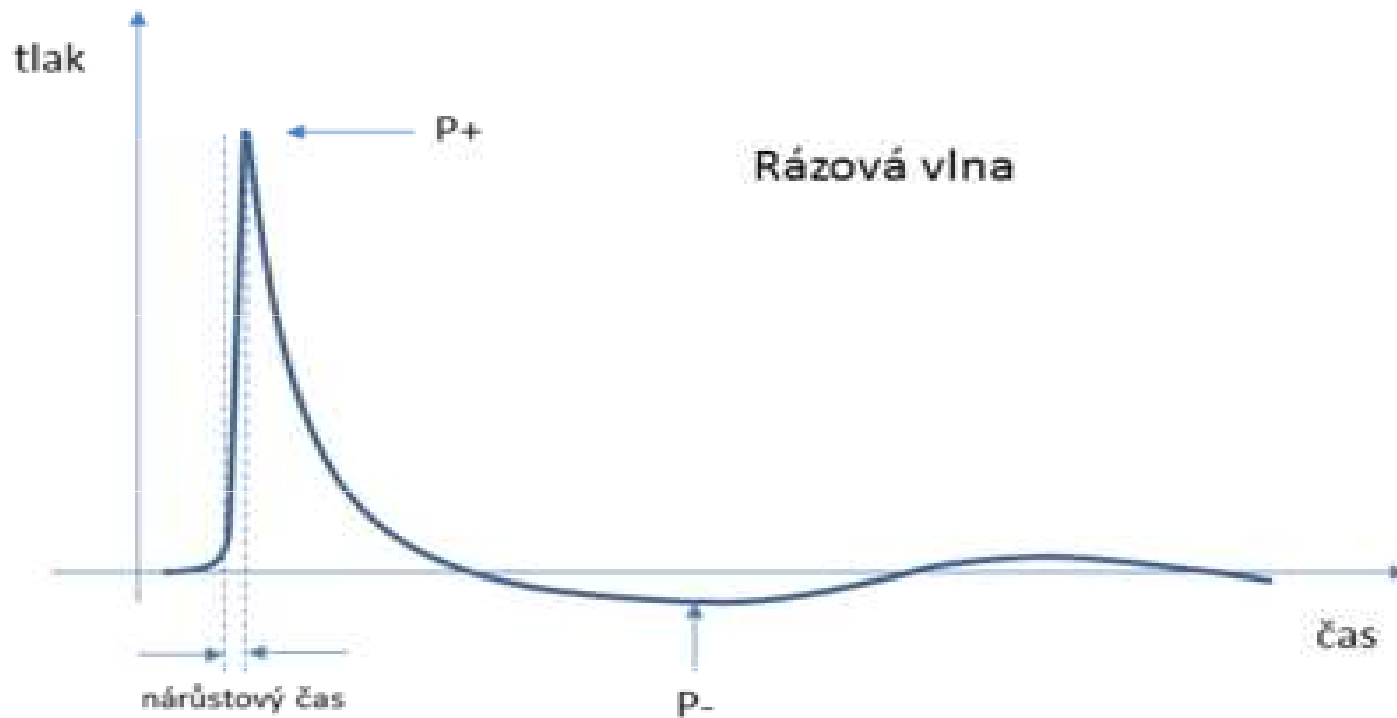


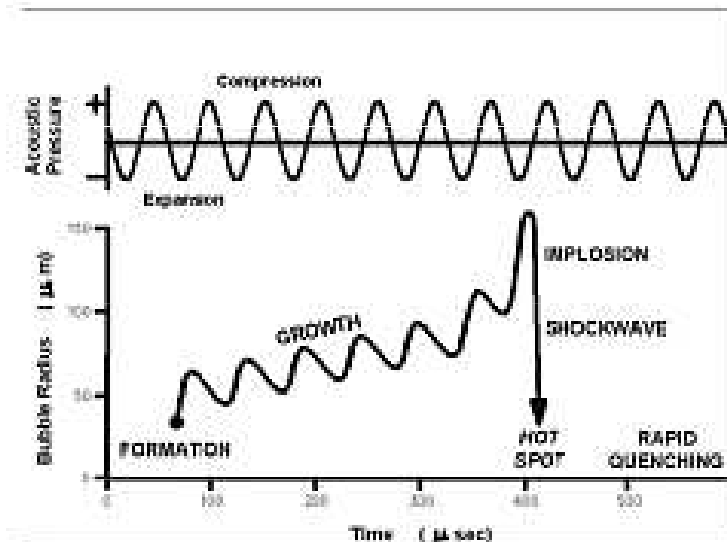
Fig. 8. Amplitude of photoacoustic-deflection and microphone signals as a function of laser fluence normalized by the ablation threshold of a dry surface F_d .

Mechanismus šíření rázové tlakové i ultrazvukové vlny je zhuštění a zředění prostředí.



Kavitace

Kavitace = vznik bublin v kapalině při lokálním poklesu tlaku (důsledek průchodu rázové akustické vlny). Kavitační bublina je zpočátku vyplněna vakuem, později do ní mohou difundovat plyny z okolní kapaliny. Při vymizení podtlaku bublina kolabuje (imploze) za vzniku rázové vlny s destruktivním účinkem na okolní materiál.



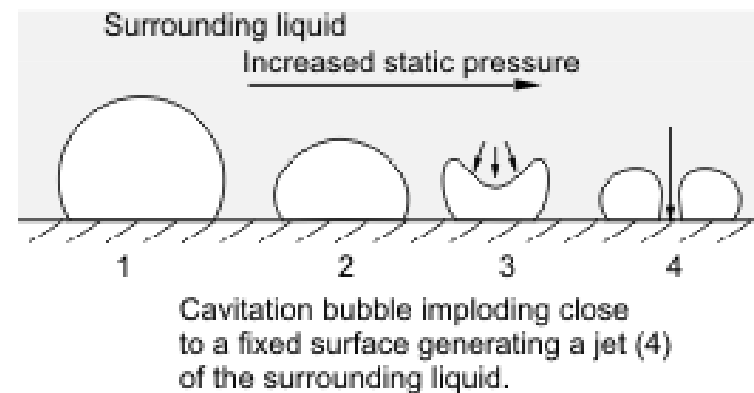
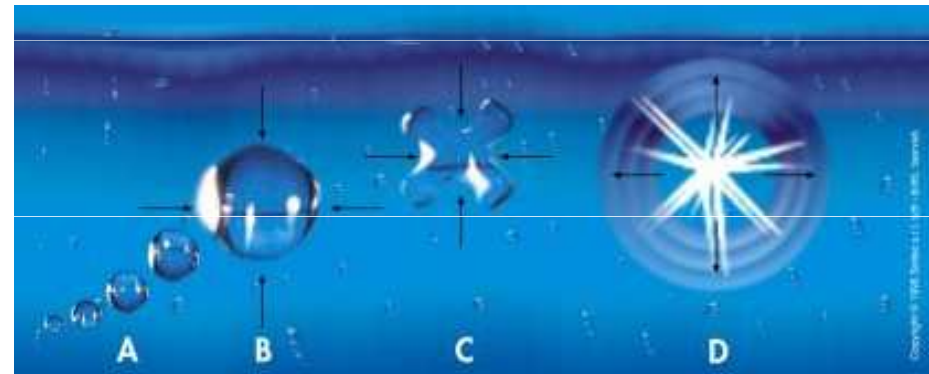
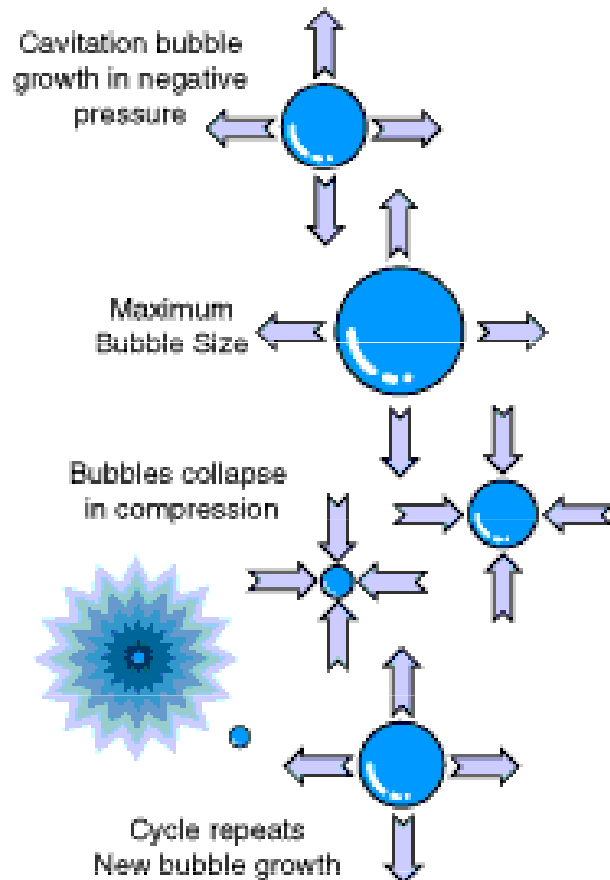
Unter
Negativdruck
bilden sich
Blasen, die mit
zunehmendem
Druck auf
maximale
Größe
anwachsen,

Blase bricht
unter
Kompression
zusammen
(„Implodiert“)

Eine neue Blase bildet sich
& der Zyklus wiederholt sich

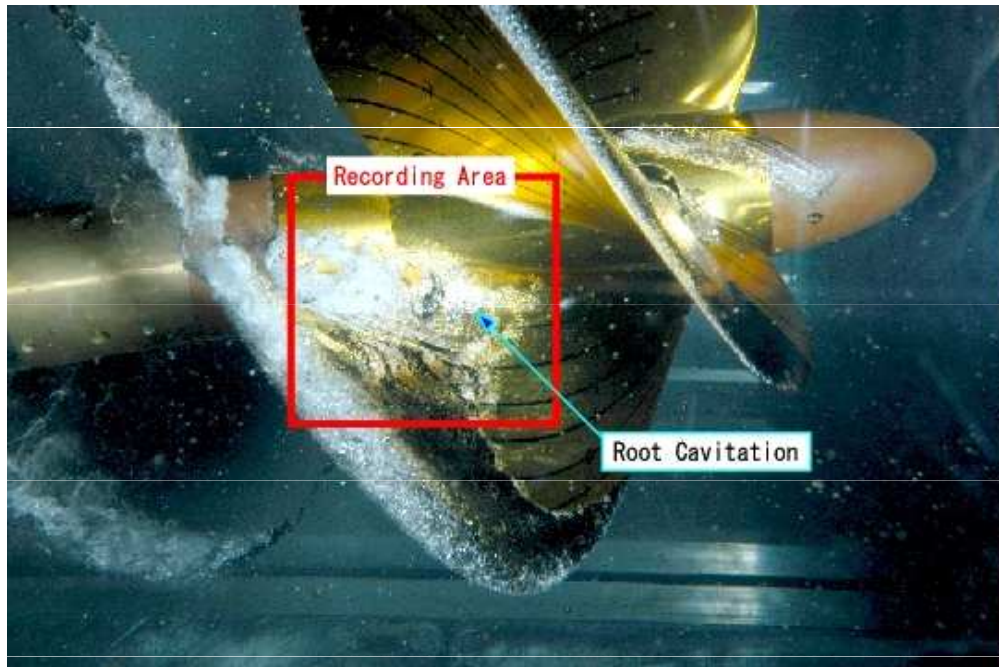
Kavitace

Na vznik kavitace má vliv především velikost podtlaku, povrchové napětí kapaliny a teplota: čím je nižší, tím menší je kavitace.



Kavitace

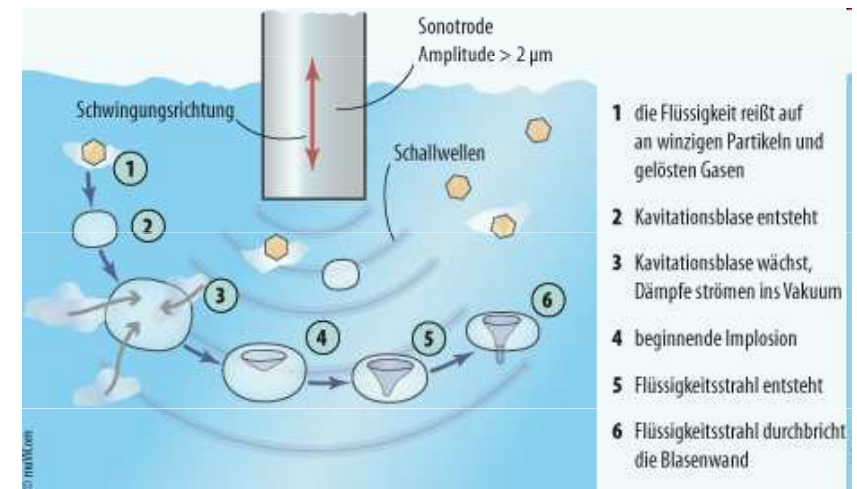
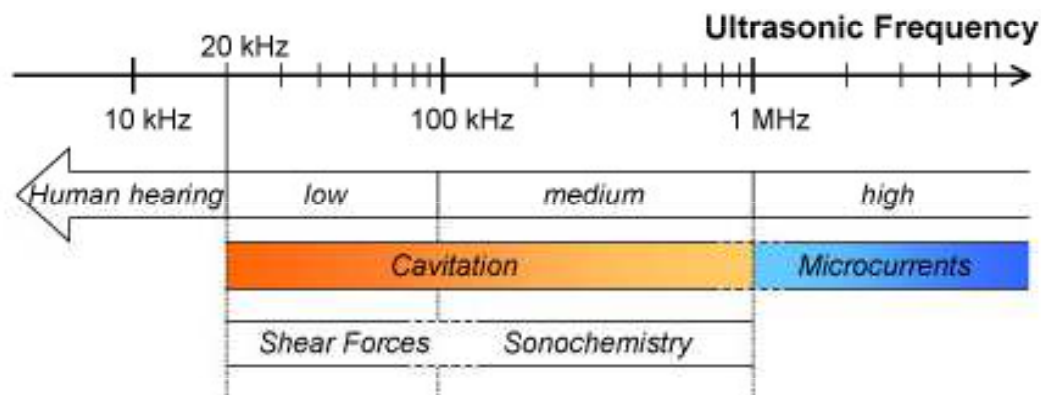
Kavitace vzniká například na lopatkách lodních šroubů, turbín, na čerpadlech a dalších zařízeních, která se velkou rychlostí pohybují v kapalině. Kavitace způsobuje hluk, snižuje účinnost strojů a může způsobit i jejich mechanické poškození.



Kavitace indukovaná ultrazvukem

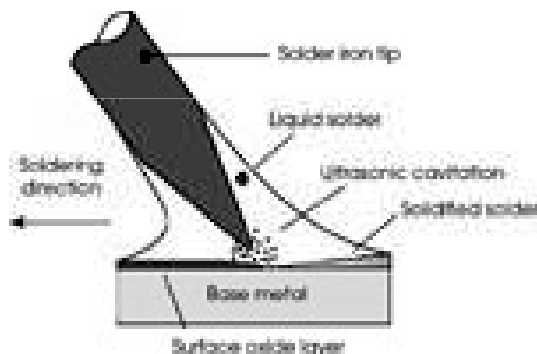
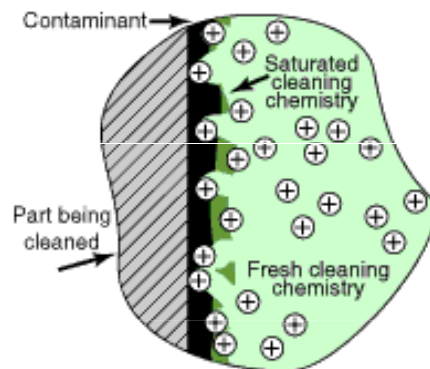
Ultrazvuk je mechanické vlnění s frekvencí vyšší 16 kHz. Ultrazvukové vlnění získáme například periodickým nabíjením destičky vhodného materiálu (např. křemene, syntetické látky). Nastává piezoelektrický jev. Vlivem proudu se materiál smršťuje a rozpíná (deformuje). A tím vzniká mechanické vlnění. Tyto destičky bývají umístěny pod dnem ultrazvukové vany a vysílají své vlnění směrem k hladině, kde se část vlnění odráží zpět ke dnu.

Přibližně v okamžiku dosažení nejmenšího poloměru produkuje bublina viditelné světlo – tzv. *sonoluminiscenci*.



Kavitace a mechanismus čištění ultrazvukem

Pro čištění je nejrozšířenější používání kmitočtů v rozmezí 20 - 100 kHz. 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.



Ultrazvukové čištění je energeticky poměrně nenáročné, největší část energie se spotřebuje na ohřev lázně. Čistící proces je možno kombinovat i s odmašťováním, případně s dezinfekcí.

Objem čistící vany. Je třeba jej volit takový, aby čištěné předměty byly dokonale ponořené.

Výkon ultrazvukového generátoru. Závislost mezi objemem vany a potřebným výkonem na jednotku objemu (Watt/litr) je nelineárně klesající.

Teplota lázně. Maximální efekt ultrazvukového čištění je v rozmezí 50-60°C (pro médium na bázi vody).

Kmitočet ultrazvuku. Nižší kmitočet má vyšší erozivní účinky a je méně absorbován čistícím médiem i předměty (proto je vhodnější pro čištění objemnějších a těžších předmětů a pro odstraňování většího znečištění), ultrazvuk vyšších kmitočetů má lepší schopnost pronikat i do nejmenších otvorů a spár.

Odplyněná voda. Běžná voda obsahuje relativně velké množství rozpuštěných plynů, především vzduchu. Protože plyn je, na rozdíl od kapalin, stlačitelný, po přivedení ultrazvuku začne pružit a tím do značné míry potlačí vznik kavitačních účinků. Proto je třeba pro čištění používat odplyněnou vodu. Tu je možné získat buď pouhým odstátím, což bývá zdlouhavé, a nebo chodem zařízení naprázdno, bez čištěných předmětů, po dobu desítek minut.