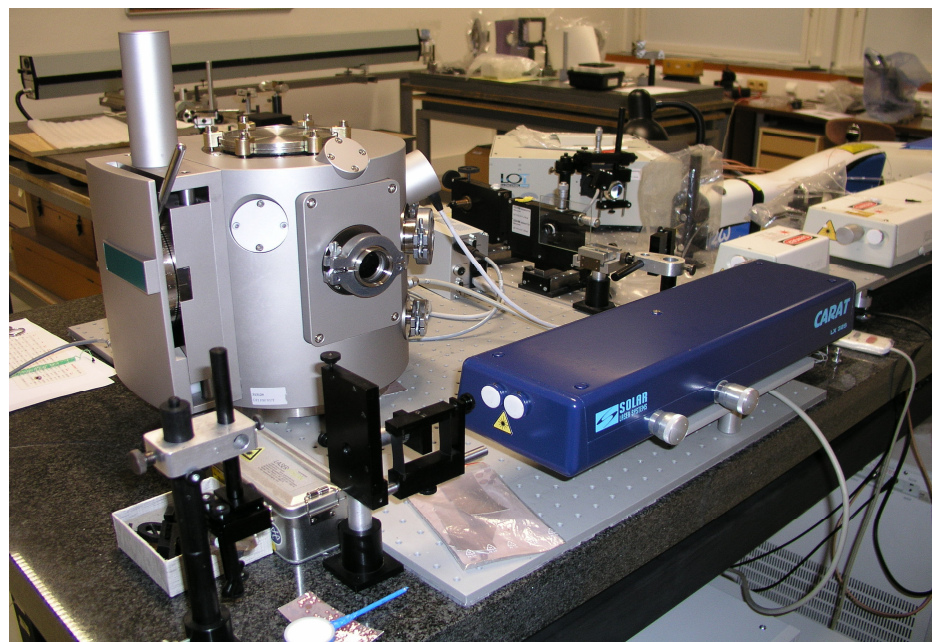


Fakulta strojního inženýrství
VUT v Brně

Speciální aplikace metody LIBS a LIBS+LIFS

Doc. Ing. Jozef Kaiser, Ph.D.



Obsah

- LIBS – shrnutí

Speciální Aplikace LIBS

- Studium čistoty a homogenity kapilárního plazmatu
- Využití laserových ablací ve stomatologii
 - Určení složení zubních past
 - Určení složení zubních výplní
 - Příměsi v zubech
- LIBS analýza kapalin / v kapalinách
 - LIBS využitím dvou laserových pulzů
 - LIBS využitím jednoho laserového pulzu

LIBS jako doplňující detekční metoda

- Detekce stopových prvků v rostlinách

„LIBS“ s laserem vyzařujícím na 46,9 nm

LIBS - shrnutí

- Technika LIBS využívá intenzivní záření (řádově GW/cm^2), vytvořené fokusováním laserového svazku pulzního laseru ke **generaci svítícího mikroplazmatu** (z pevných, kapalných nebo plyných vzorků) v ohniskové vzdálenosti fokusující čočky.
- Složení plazmatu odpovídá složení analyzovaného materiálu.
- Typická LIBS plazma je generována použitím laserového svazku o energii 10-50 mJ v pulzech s dobou trvání přibližně 10 ns.
- Fokusováním tohoto svazku na plochu o velikosti $\sim 0,01 \text{ mm}^2$ můžeme dosáhnout elektronové hustoty od 10^{15} cm^{-3} do 10^{18} cm^{-3} .

LIBS - shrnutí

- K využití metody LIBS k analytickým účelům je nutné určit **parametry laserem generované plasmy** a to elektronovou hustotu, teplotu, tvar spektrálních čar a jejich vliv na analytické výsledky.
- Detekční limity se pohybují od **desítek do stovek ppm**.
- Snížení detekčních limitů (až na jednotky ppm) může být dosaženo, pokud jsou atomy daného prvku v již vytvořeném plazmatu excitovány laditelným kontinuálním či pulzním laserem (metoda **LIBS+LIFS**).
- LIBS může být aplikována pro rychlou a jednoduchou základní analýzu materiálu (**vyhodnocení dat v reálném čase**).
- Žádná nebo velmi **malá příprava analyzovaného materiálu**.
- Možnost **mobilní spektroskopické analýzy**.

LIBS - shrnutí

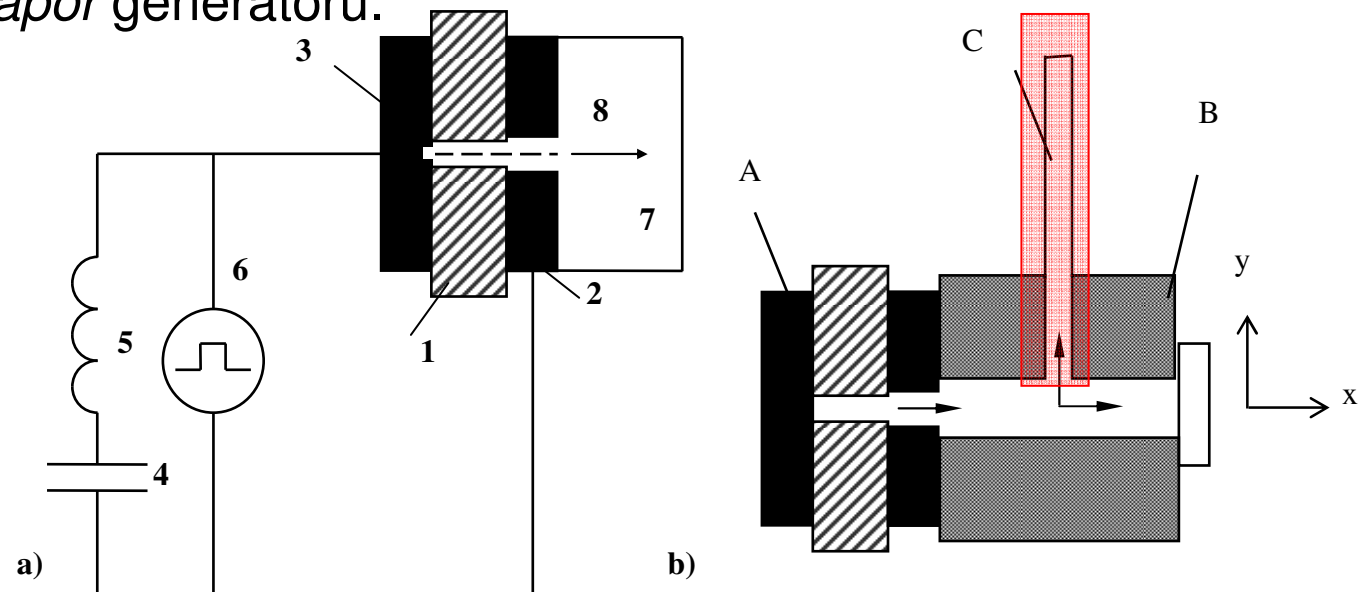
- Od počátku existence LIBS až do současné doby se vyskytují velmi rozmanité oblasti aplikací, popsané v mnoha odborných publikacích.
- Jako příklad bychom mohli uvést monitorování kvality materiálů a svarů v případě kovových konstrukcí nebo oblast monitorování životního prostředí (kapalné, plynné, pevné vzorky); zkoumání kontaminací v průmyslových i těžko dostupných/nebezpečných prostředích využitím optických vláken atd.

Speciální Aplikace LIBS

- Studium čistoty a homogenity kapilárního plazmatu
- Využití laserových ablací ve stomatologií
 - Určení složení zubních past
 - Určení složení zubních výplní
 - Příměsi v zubech
- LIBS ve vodě/pod vodou (kapalinou)
 - LIBS využitím dvou laserových pulzů
 - LIBS využitím jednoho laserového pulzu

LIBS - Studium čistoty a homogenity kapilárního plazmatu

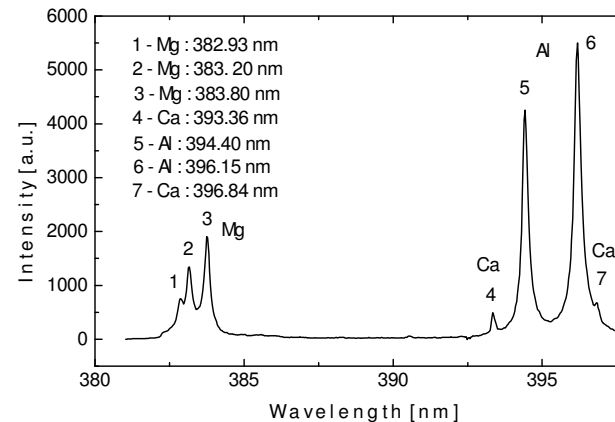
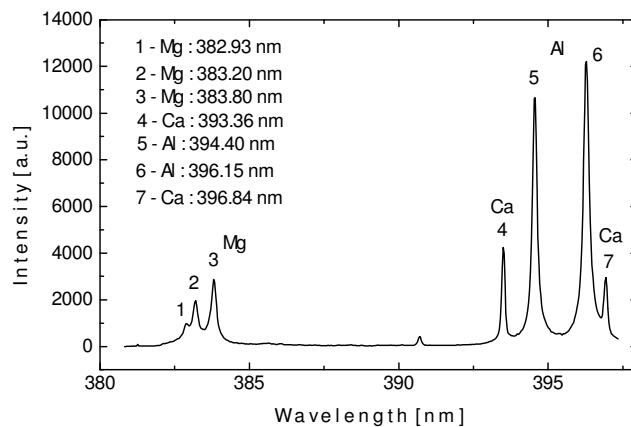
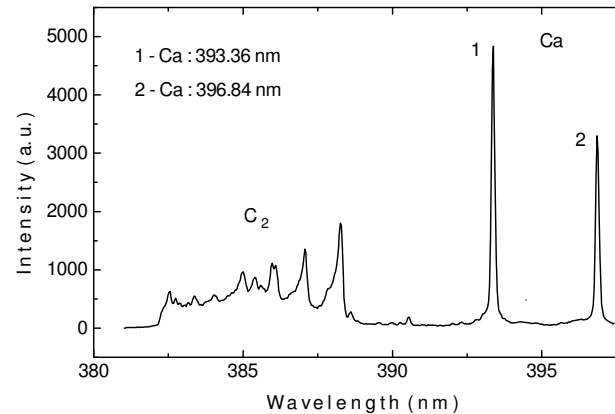
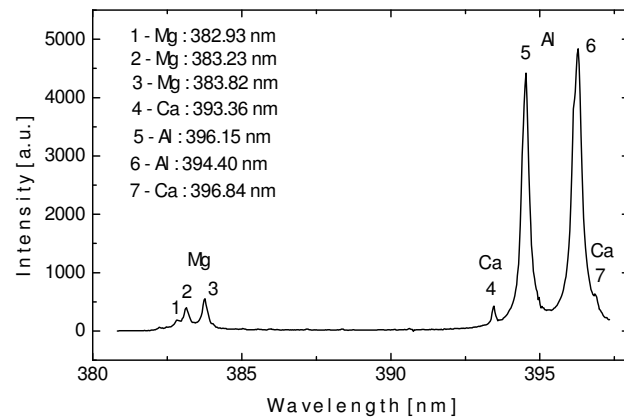
- Motivace:* Studium **čistoty kapilárního plazmatu** - měření čistoty a homogenity Al vrstvy vytvořené pomocí kapilárního výboje v různých místech *metal-vapor* generátoru.



- a) Náčrt experimentálního zařízení pro generaci plazmatu: 1 – kapilára, 2 – anoda, 3 – katoda, 4 – kondenzátor, 5 – cívka, 6 – generátor HV pulzů, 7 – vakuová komora, 8 – tok plazmy.
- b) Generátor s difúzní komorou: A – generátor, B – difúzní komora C – kanál pro homogenní plazmu.

LIBS - Studium čistoty a homogenity kapilárního plazmatu

- Motivace:* Studium **čistoty kapilárního plazmatu** - měření čistoty a homogenity Al vrstvy vytvořené pomocí kapilárního výboje v různých místech *metal-vapor* generátoru.



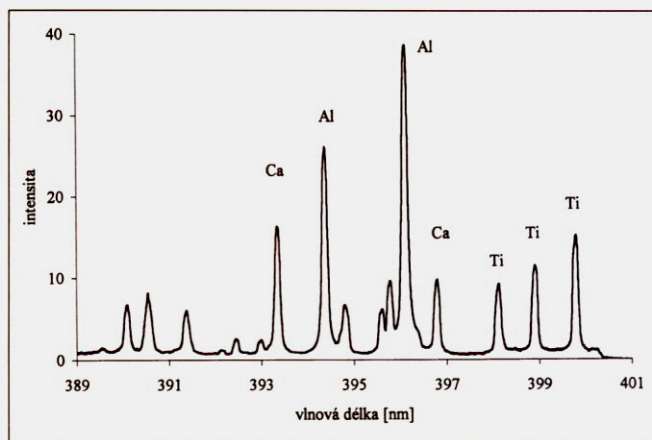
LIBS - Využití laserových ablací ve stomatologii

Určení složení zubních past

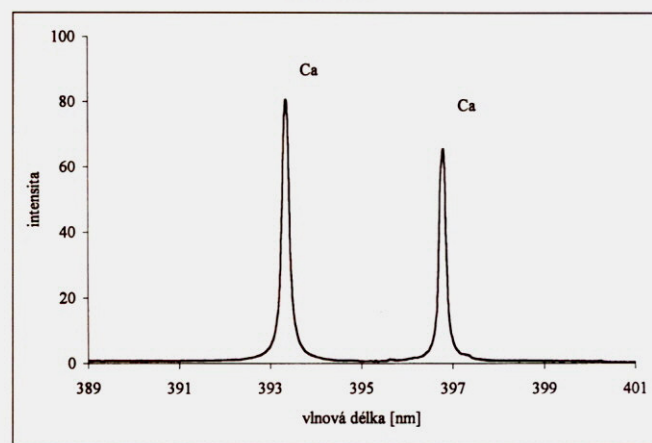
- *Motivace:* Lidské zuby jsou každodenně vystavovány množství chemických látek při přijímání potravy, při čištění zubů nebo přítomností zubních výplní. Každá z těchto látek může kontaminovat zub a určité prvky mohou migrovat i do zubní tkáně. Z těchto důvodů bylo experimentálně zjištěno složení pěti vybraných zubních past. V počátečních experimentech byly detekovány prvky jako např. Ti, Zn, Cr, Ca a Al.

LIBS - Využití laserových ablací ve stomatologii

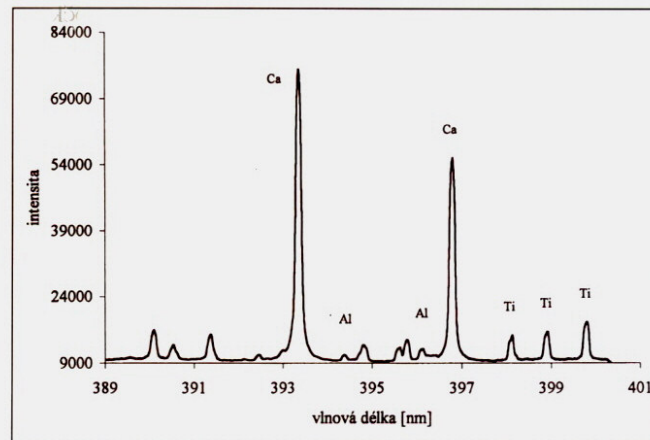
Určení složení zubních past



Spektrum získané ze zubní pasty (výrobce A) s bělícím účinkem



Spektrum získané ze zubní pasty bez bělících přísad



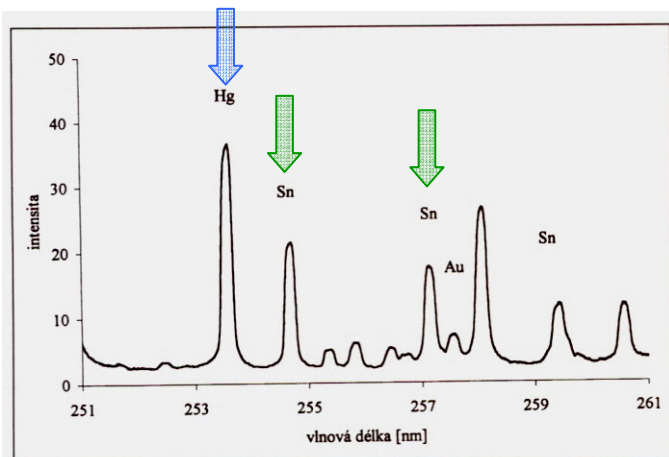
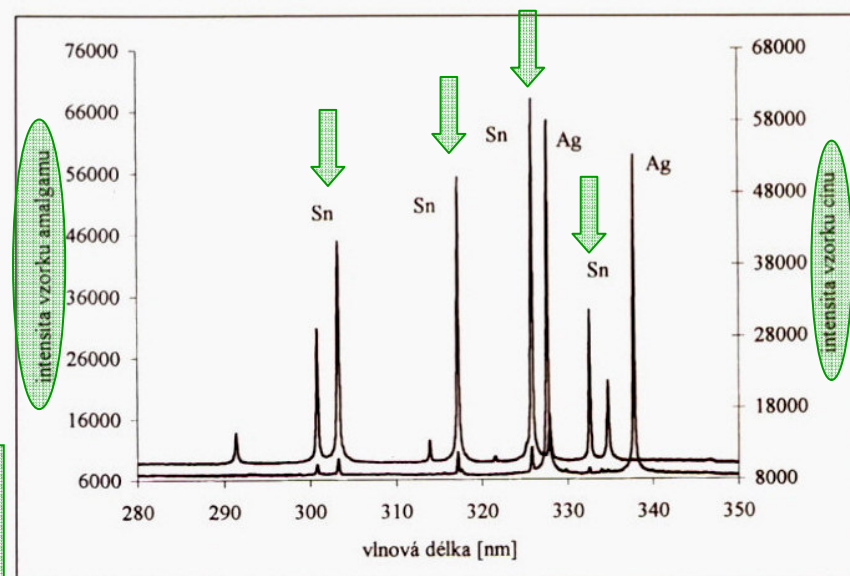
Spektrum získané ze zubní pasty (výrobce B) s bělícím účinkem

LIBS - Využití laserových ablací ve stomatologii

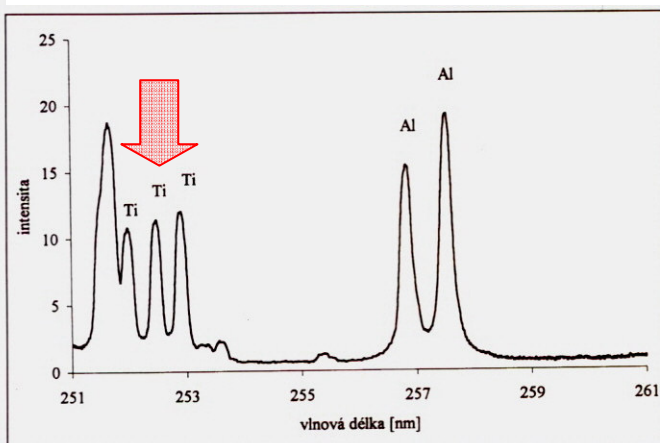
Určení složení zubních výplní

Další látka, která může potencionálně kontaminovat zub, je zubní výplň. U vybraných pěti vzorků výplní (amalgamové a bílé) bylo zjištěno jejich složení.

Identifikace neznámého prvku ve výplni podle čar získaných z čistého vzorku cínu (Sn – stannum).



Obr. 5a Spektrum získané ze zubní výplně - amalgam



Obr. 5b Spektrum získané ze zubní výplně A - bílá

Srovnání dvou zubních výplní. Z experimentů vyplývá, že je možné identifikovat i velmi malé rozdíly ve složení jednotlivých druhů výplní.

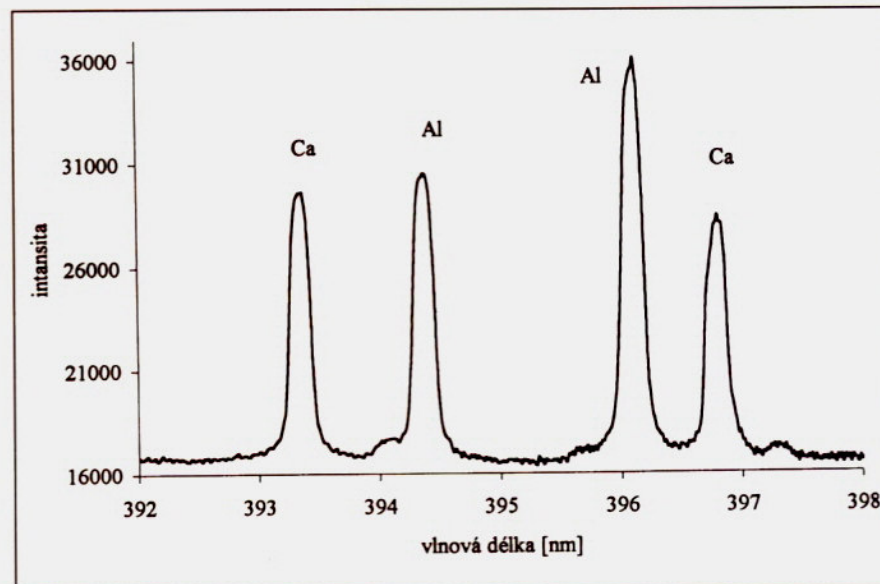
LIBS - Využití laserových ablací ve stomatologii

Příměsi v zubech

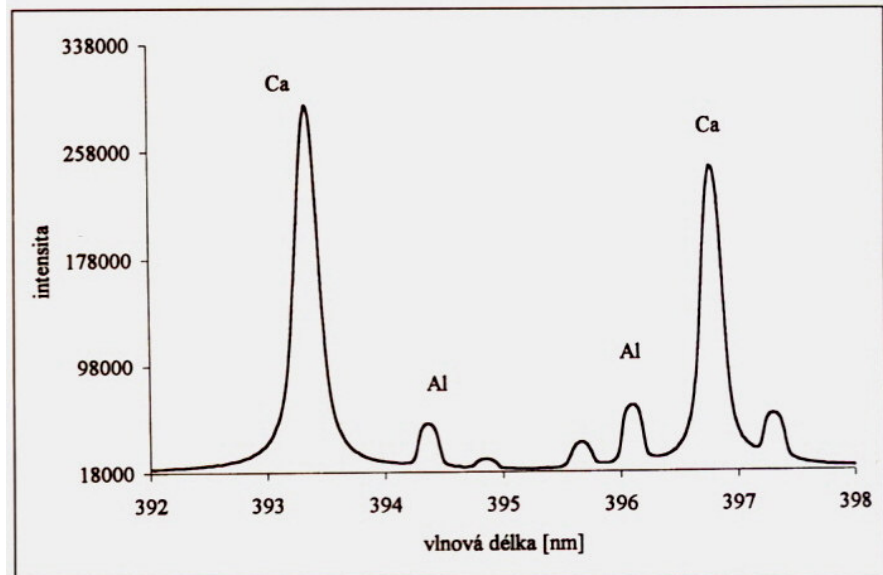
- Protože Al bylo zjištěno jako příměs jak v zubních pastách, tak i ve výplních, byly další experimenty zaměřeny pouze na tento prvek.
- Na vzorcích 20 lidských zubů (z toho šesti dětských) byly provedeny LIBS experimenty vedoucí k identifikaci Al **asi v jedné třetině vzorků**.
- Al bylo přítomno **jak ve vrchní vrstvě zubu, tak i v jeho objemu** (zub je složen především z hydroxyapatitu, vody a kolagenových vláken).
- Překvapivé bylo, že k **migraci Al došlo i u dvou prvních dětských zubů**.
- Dané experimenty naznačují, že k migraci mohlo dojít z Al obsaženého v zubní pastě nebo výplni.

LIBS - Využití laserových ablací ve stomatologii

Příměsi v zubech



Spektrum získané ze zubní výplně B - bílá



Spektrum získané ze zubu (vzorek od dospělého pacienta) ve vzdálenosti 1,5 mm od kraje výplně. Zub byl podélně rozříznut. Výplň byla centrována uprostřed zubu a měla přibližně kruhový tvar, poloměr 1 mm

LIBS - Využití laserových ablací ve stomatologii

Kvantitativní analýza

Kalibrační křivky

Table 1

Contents of sample pellets — Al/Pb/Sr weight relative to Ca weight. Matrix, CaCO_3 ; aluminium trace, $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \times 9\text{H}_2\text{O}$; lead trace, PbCO_3 $\text{Pb}(\text{OH})_2$; and strontium trace, SrCO_3 ^a

Sample no.	Element concentration, relative to Ca (%)						
	1	2	3	4	5	6	7
Al	0.024	0.037	0.057	0.118	0.19	0.50	1.00
Pb	0.028	0.034	0.067	0.112	0.22	0.49	0.97
Sr	0.025	0.030	0.065	0.124	0.25	0.62	1.00

^aMeasurement error in trace amounts: 0.002.

SAMEK, O. BEDDOWS, D.C.S. TELLE, H.H. KAISER, J. LIŠKA, M CÁCERES, J.O. URENA, A.G.: Spectrochimica Acta Part B **56**, 2001, 865-875.

LIBS - Využití laserových ablací ve stomatologii

Kvantitativní analýza

Kalibrační křivky

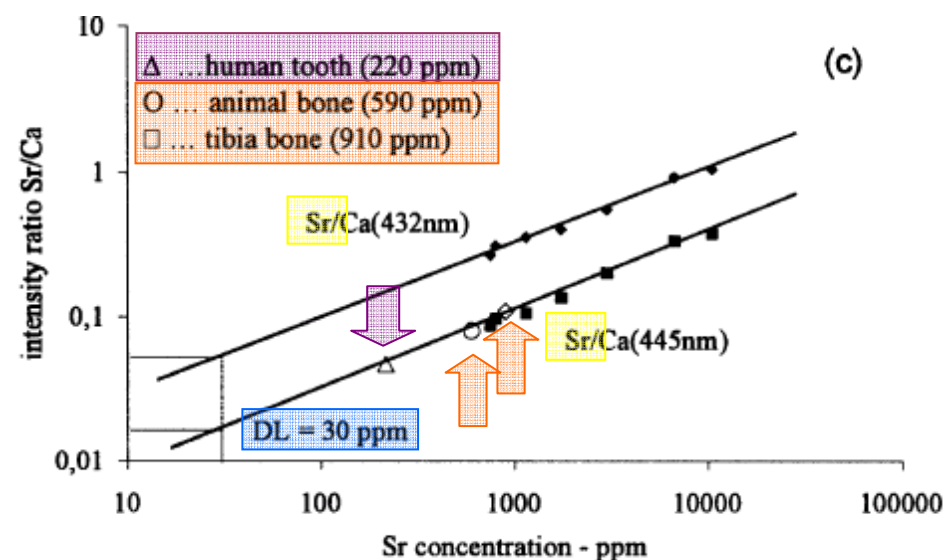
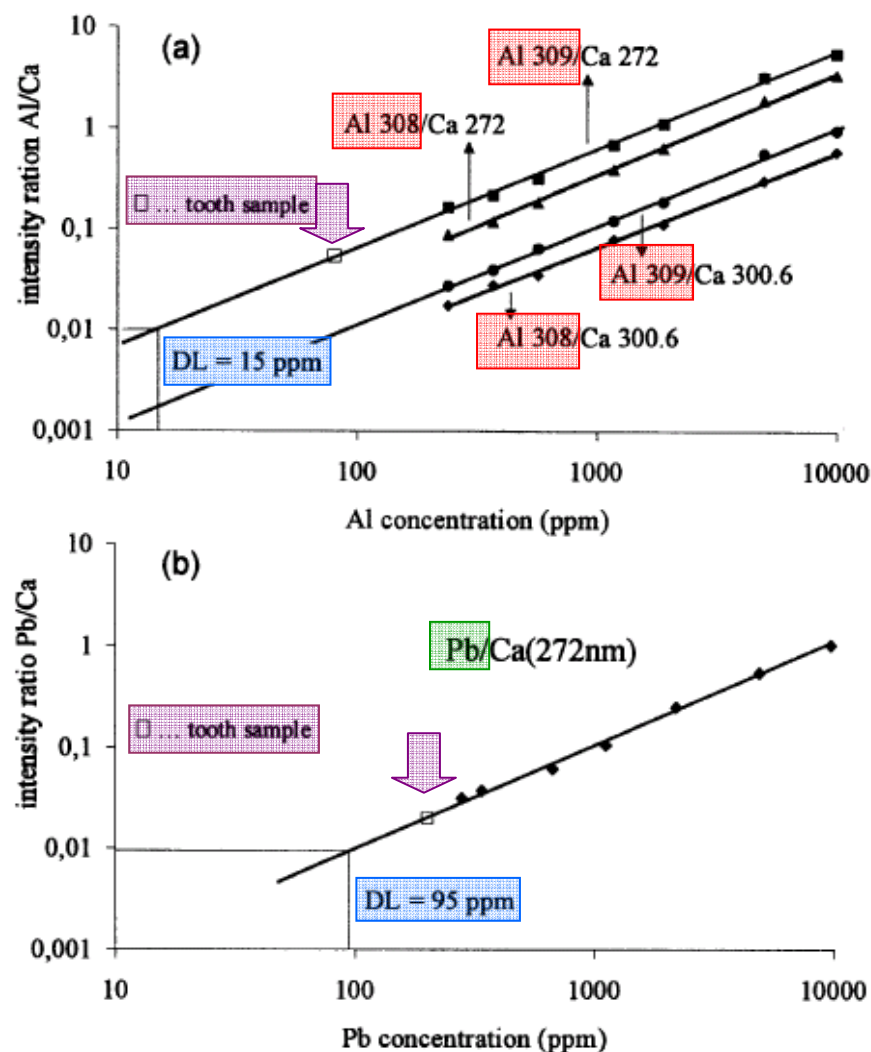


Fig. 3. Calibration curves for (a) **Al**, (b) **Pb** and (c) **Sr**, obtained applying univariate analysis to line ratios of the trace element and Ca, recorded from reference pellets (CaCO_3 matrix). For the calibration, line pairs included $\lambda_{\text{Al}} = 308 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{Al}} = 309 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{Sr}} = 461 \text{ nm}$ and $\lambda_{\text{Pb}} = 261 \text{ nm}$ for the trace element, and $\lambda_{\text{Ca}} = 272 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{Ca}} = 301 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{Ca}} = 432 \text{ nm}$ and $\lambda_{\text{Ca}} = 453 \text{ nm}$ for calcium. Detection limits (3σ) are marked by DL. Selected measurement data from **tooth** and **bone** samples are included (indicated by open symbols).

LIBS - Využití laserových ablací ve stomatologii

Kvantitativní analýza

Srovnání

Table 2

Relative and absolute contents of Sr and Ca in bone and teeth

Sample	Measurement method	Average Ca in specimen (%)	Sr content (ppm)	Sr/Ca ratio (ppm)	Reference
Human bone (general average)	ICP-AES	$\cong 24.5\%$	60–280	$\cong 250\text{--}1100$	[20]
Tibia bone	LIBS			910 ± 65	This work
Femur bone	LIBS			330 ± 28	This work
Femur bone ^a	AAS			295 ± 12	This work
Teeth (dentin)	AAS	$\cong 28.2\%$	200	710	[19]
Wisdom tooth (enamel)	LIBS			310 ± 26	This work
Wisdom tooth (dentin)	LIBS			220 ± 20	This work

^aCross-reference measurement.

SAMEK, O. BEDDOWS, D.C.S. TELLE, H.H. KAISER, J. LIŠKA, M CÁCERES, J.O. URENA, A.G.: Spectrochimica Acta Part B **56**, 2001, 865-875.

LIBS - Využití laserových ablací ve stomatologii

Prostorové rozložení

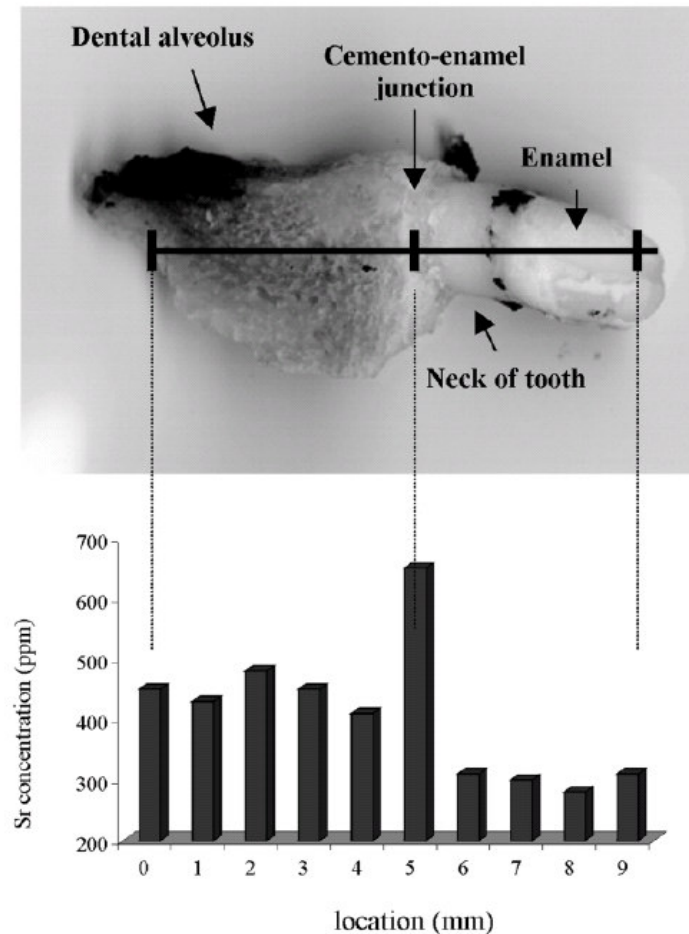


Fig. 4. One-dimensional measurement map for Sr concentration, recorded along the outside of an infant's tooth. The differences of Sr concentration in the tooth parts of different hardness are quite evident.

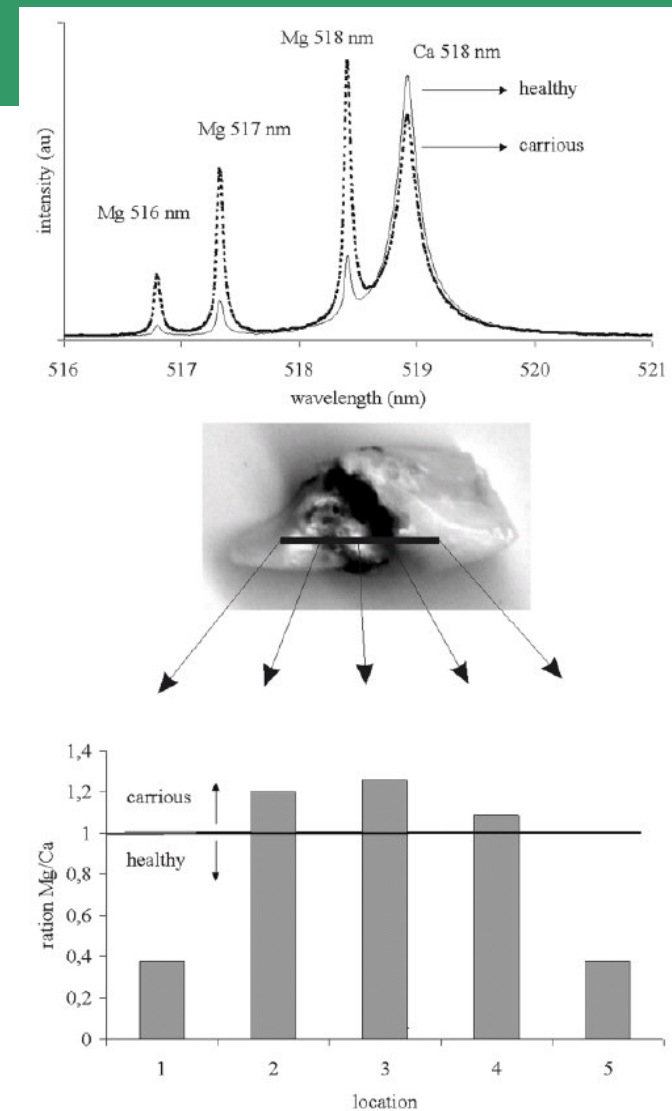


Fig. 5. One-dimensional measurement map for the ratio of Mg content to Ca content, for a section of a caries-infected tooth. The increased Mg concentration clearly identifies the part of the tooth 'softened' by caries.

LIBS - Využití laserových ablací ve stomatologii

Prostorové rozložení

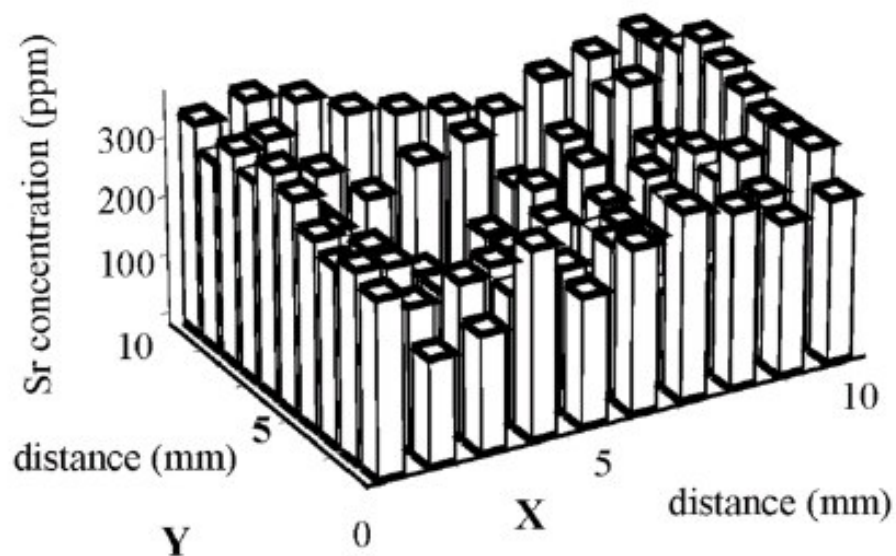
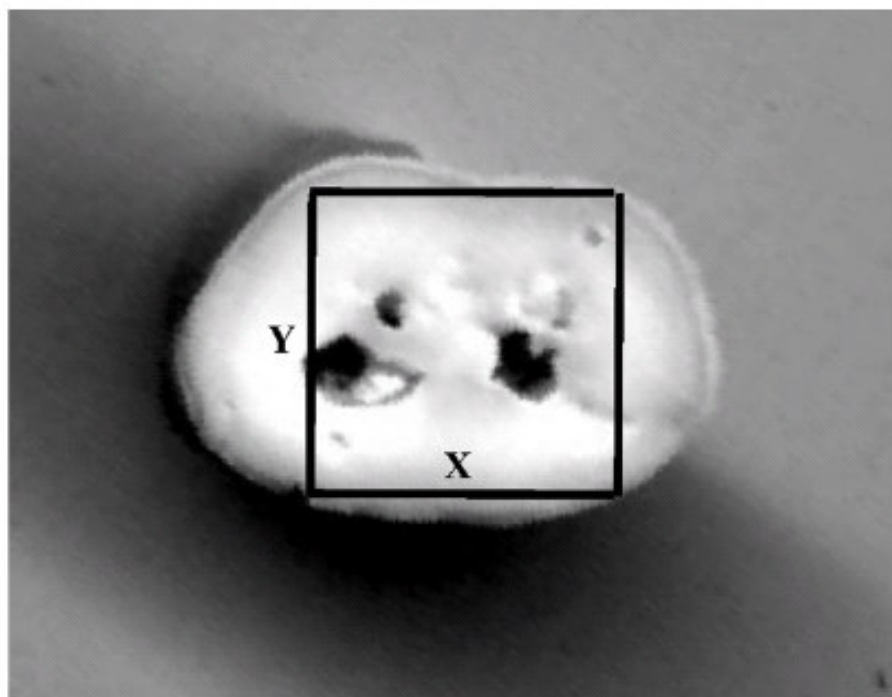


Fig. 6. Two-dimensional measurement map for Sr concentration, recorded from a cross-sectional cut through a wisdom tooth. The Sr concentration diminishes toward the root canals (black in areas in the picture).

SAMEK, O. BEDDOWS, D.C.S. TELLE, H.H. KAISER, J. LIŠKA, M CÁCERES, J.O. URENA, A.G.: Spectrochimica Acta Part B **56**, 2001, 865-875.

LIBS - Využití laserových ablací ve stomatologii

Prostorové rozložení

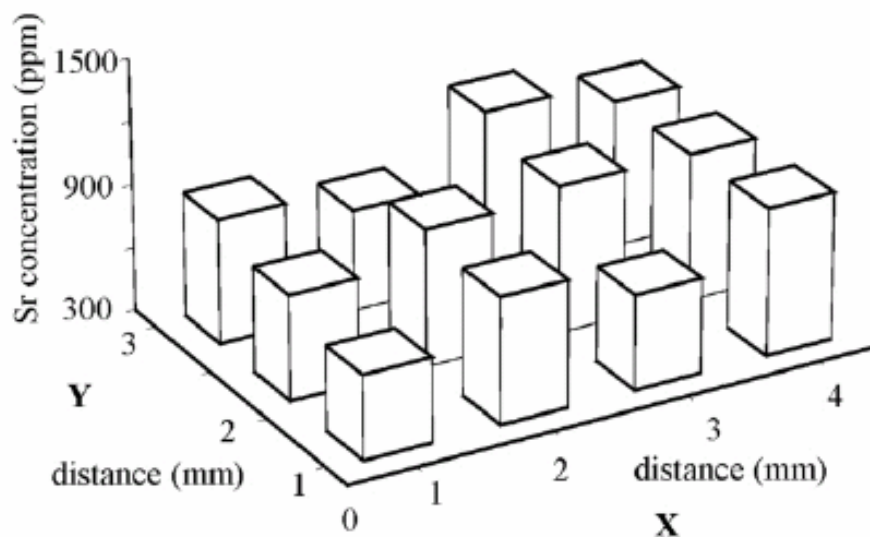
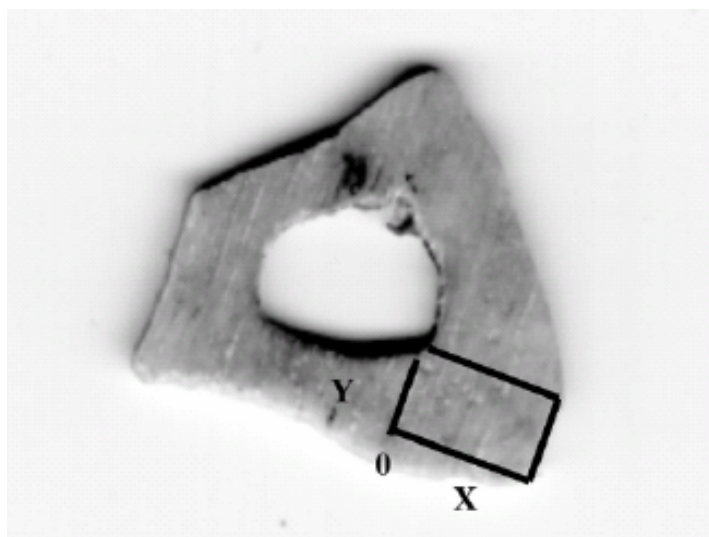


Fig. 7. Two-dimensional measurement map for Sr concentration, recorded from a cross-sectional cut through a tibia bone.

SAMEK, O. BEDDOWS, D.C.S. TELLE, H.H. KAISER, J. LIŠKA, M CÁCERES, J.O. URENA, A.G.: Spectrochimica Acta Part B **56**, 2001, 865-875.

LIBS - analýza kapalin / v kapalinách

LIBS využívající dva laserové pulzy

- *Princip:*
- První laserový pulz vytvoří plynovou bublinu (odpaří část roztoku).
- Druhý pulz zahřeje/ionizuje plyn+páry uvnitř bubliny (v čase maximální expanze)
 - důležitá synchronizace
- Lze použít na detekci přítomnosti různých chemických prvků v kapalinách nebo na analýzu předmětů ponořených v kapalinách.

LIBS - analýza kapalin / v kapalinách

LIBS využívající dva laserové pulzy – Příklad – detekce manganu v roztoku

Využití: - např. monitorování kvality pitné vody – WHO a EN ISO 11885 1198 – 03/EPA: Mn 0,5 – 0,05 mg/l

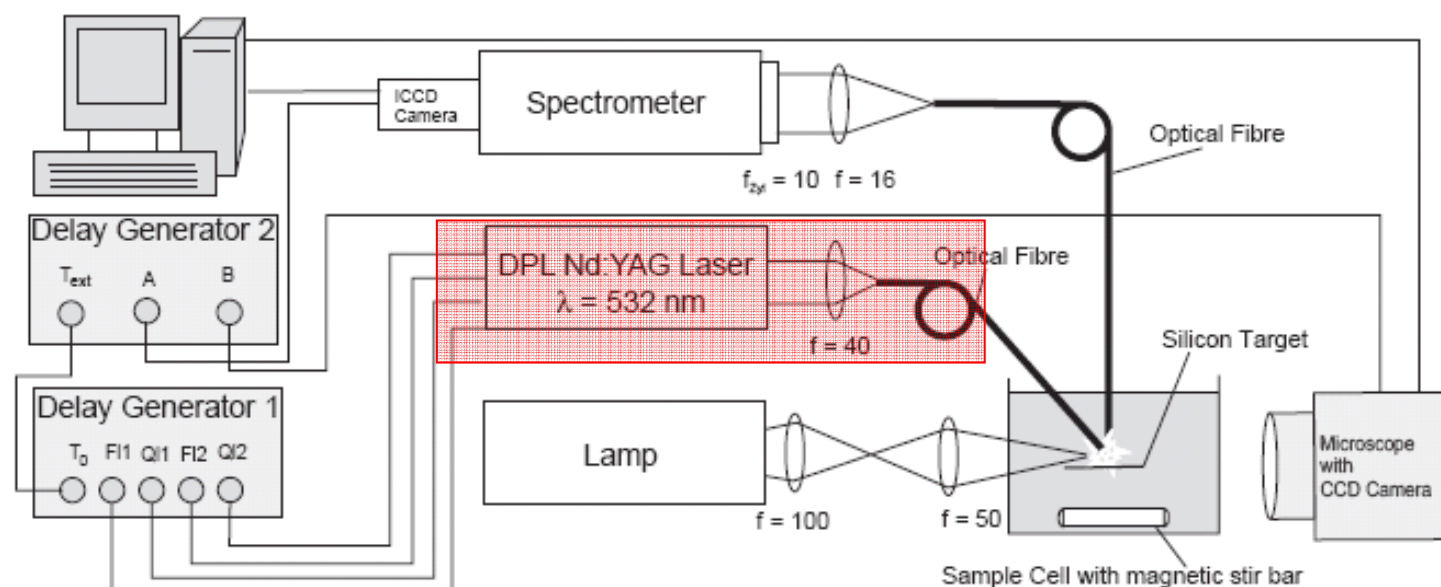


Fig. 1. Schematic dual-pulse LIBS setup.

Generace plazmatu
 $\lambda = 532 \text{ nm}$, $t = 6 \text{ ns}$
1. puls 7 MW/cm^2
2. puls $6,2 \text{ MW/cm}^2$
 $\Delta t = 80 \mu\text{s}$
(maximum expanse
bubliny vytvořené
prvním pulsem)

LIBS - analýza kapalin / v kapalinách

LIBS využívající dva laserové pulzy – Příklad

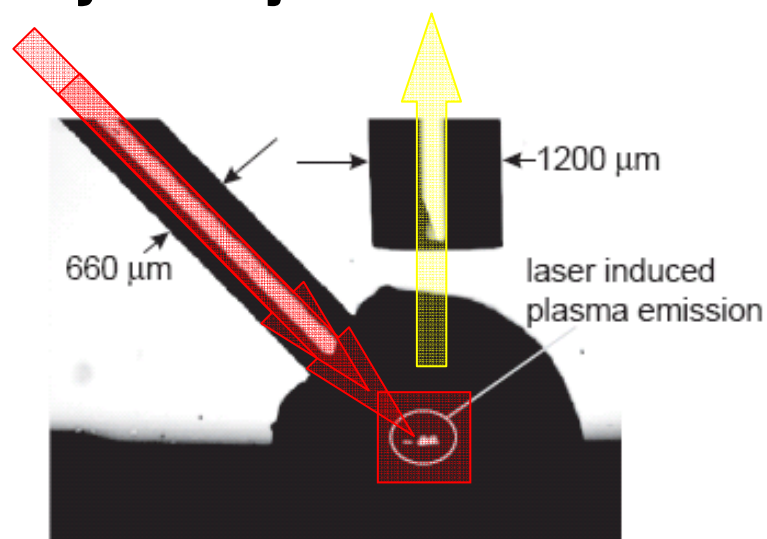


Fig. 2. Shadow image of cavitation bubble showing the laser ablation fibre (left) and the spectroscopic fibre (top).

Generace plazmatu

$\lambda = 532 \text{ nm}$, $t = 6 \text{ ns}$

1. pulz 7 MW/cm^2

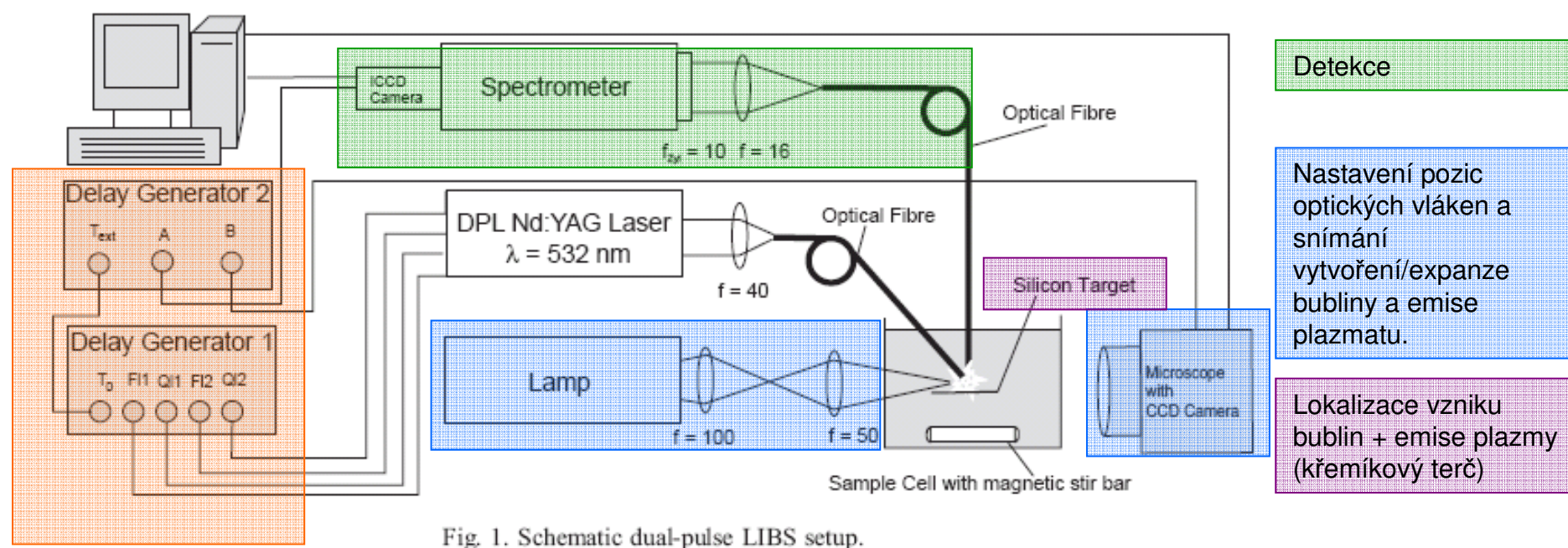
2. pulz $6,2 \text{ MW/cm}^2$

$\Delta t = 80 \text{ μs}$

(maximum expanse
bubliny vytvořené
prvním pulzem)

LIBS - analýza kapalin / v kapalinách

LIBS využívající dva laserové pulzy – Příklad



Časování experimentu:

DG 1: Energie Pulzu 1, Energie Pulzu 2, Zpoždění mezi pulzem 1 a 2.

DG 2: Spektroskopická analýza (pozorovací okno: zpoždění 450 – 600 ns, délka 1 - 10 μs), Snímání plazmy (časově rozlišená)

Detekce

Nastavení pozic optických vláken a snímání vytvoření/expanze bubliny a emise plazmatu.

Lokalizace vzniku bublin + emise plazmy (křemíkový terč)

LIBS - analýza kapalin / v kapalinách

LIBS využívající dva laserové pulzy – Příklad, Výsledky

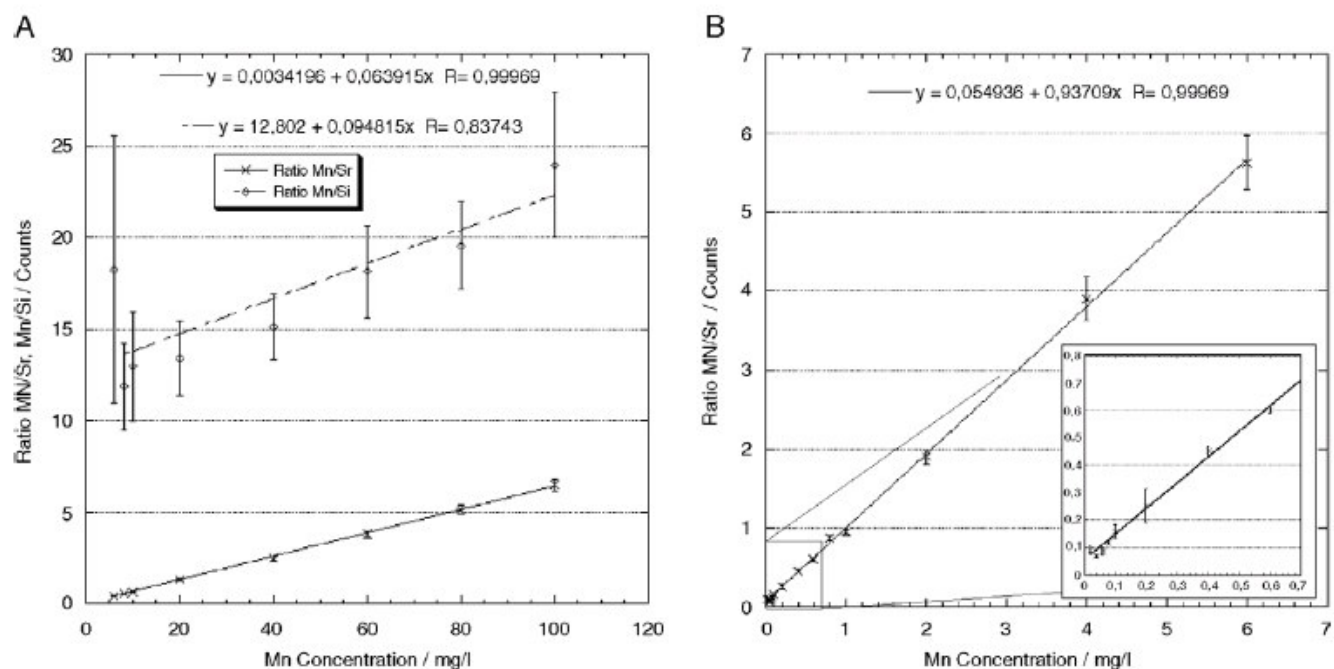


Fig. 5. A: Calibration curve between 6 and 100 mg/l Mn, 10 mg/l Sr and Si as internal standards; B: Calibration curve between 0.02 and 6 mg/l Mn, 1 mg/l Sr as internal standard. The inset shows a magnification of the values down to 0.6 mg/l.

Kalibrační křivky sestaveny pomocí známých koncentrací stroncia (Sr) a křemíku (Si).

KOCH, S. COURT, R. GAREN, W. NEU, W. REUTER, R.: Spectrochemica Acta Part B
60, 2005, 1230-1235.

LIBS - analýza kapalin / v kapalinách

LIBS využívající dva laserové pulzy – Příklad, Výsledky

Table 1

Compilation of experimentally determined manganese concentrations, pollution limits, and seasonal variations in the Wadden sea

Reference	Mn _{diss.} -concentration	Mn _{diss.} -concentration/ μmol/l
<i>LIBS LOD</i>		
Samek et al. [9]	10 mg/l	182.02
Yueh et al. [10]	700 μg/l	12.74
Kumar et al. [11]	0.6 ppm	10.92
This paper	80 μg/l	1.46
<i>Pollution limits in drinking water</i>		
WHO [19]	0.5 mg/l	9.10
EPA [20]	0.05 mg/l	0.91
<i>Concentration in the Wadden sea</i>		
Summer [18]	88 μg/l	1.60
Winter [18]	0.5 μg/l	0.01

All concentrations are also given in micromoles per liter.

Experimentálně stanoveny koncentrace manganu (z předešlých prací).

Diskutovaná práce: detekční limit ~ 80 μg/l.

KOCH, S. COURT, R. GAREN, W. NEU, W. REUTER, R.: Spectrochemica Acta Part B
60, 2005, 1230-1235.

LIBS - analýza kapalin / v kapalinách

Nešlo by to jedním laserovým pulzem?



LIBS - analýza kapalin / v kapalinách

LIBS využívající jeden laserový pulz

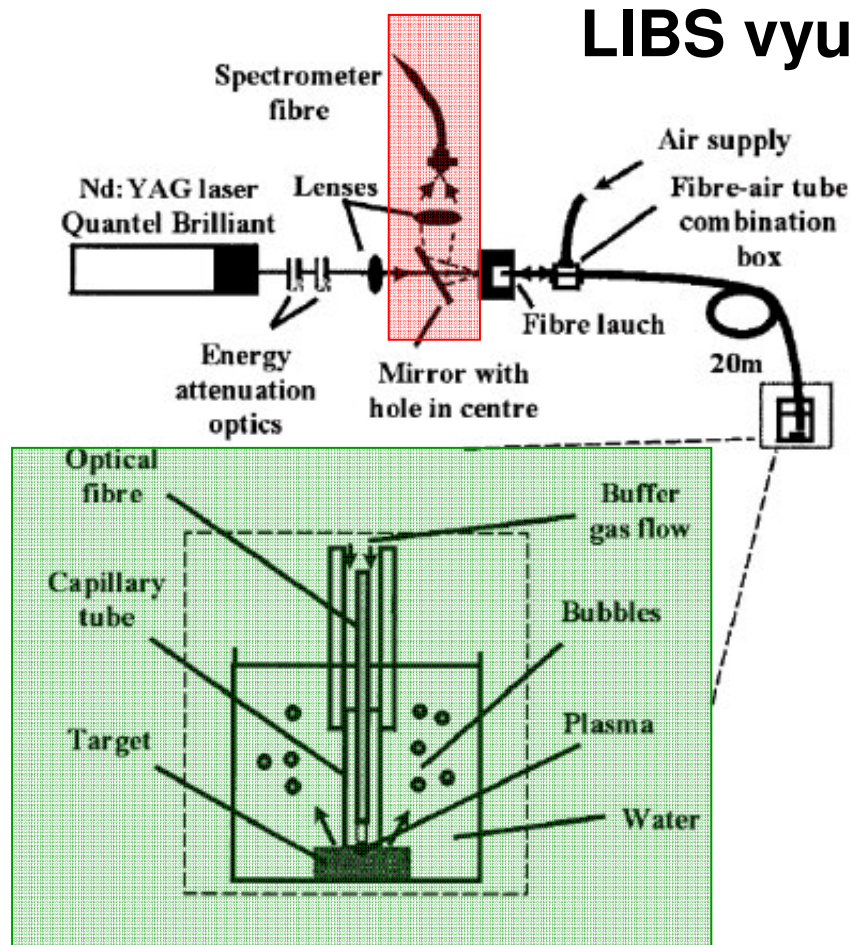


Fig. 1. Schematic layout of the underwater LIBS arrangement.
Inset: enlarged view of the target site.

- Přes optické vlákno se šíří ablační pulz ke vzorku, vlákno rovněž slouží k přenosu světla emitovaného vytvořenou mikroplazmou do spektrometru.
- Laserový pulz dopadá pod nárazníkovým plynem (buffer gas).

LIBS - analýza kapalin / v kapalinách

Srovnání měření pod vodou a na vzduchu

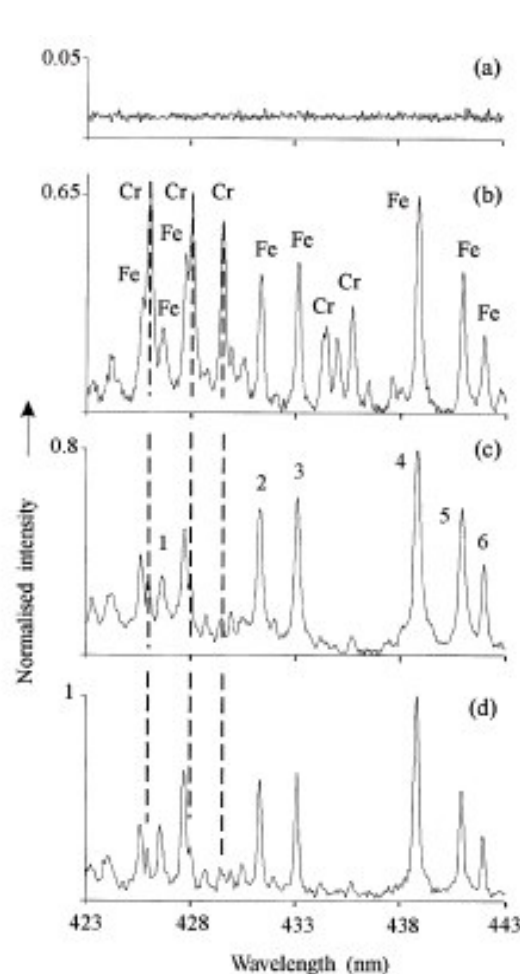


Fig. 2. LIBS spectra of steel samples submerged in water. Ferritic steel (24% Cr) without buffer gas (a) and with N_2 buffer gas (b); low alloy steel (0.7% Cr) with N_2 buffer gas (c). For comparison, a spectrum of the low alloy steel recorded in ambient air is shown (d). Dashed lines: Cr resonance lines at 425.43, 427.47 and 428.97 nm. All spectra are normalised relative to the Fe peak #4 in (d).

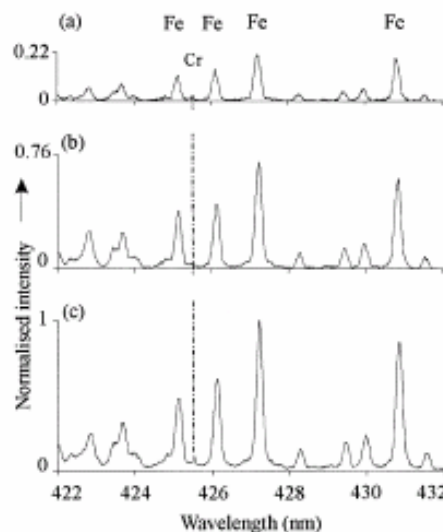


Fig. 3. LIBS emission spectra recorded for the low alloy steel sample (0.77% Cr) submerged in water, for different argon gas flows. (a) Low flow—1.1 bar backing pressure; (b) medium flow—1.5 bar backing pressure; (c) high flow—2 bar backing pressure. The dashed line indicates the Cr 425.43 nm line. All spectra are normalised relative to the Fe 427.18 nm line in (c).

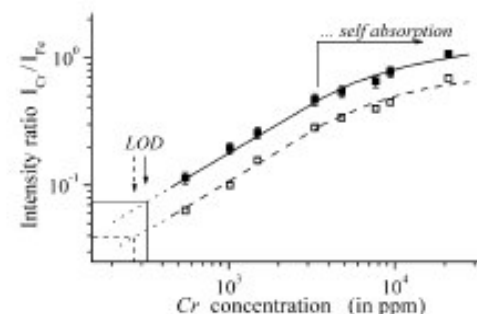


Fig. 4. Concentration of Cr in steel alloys, based on the line pair Cr 427.48 nm and Fe 426.04 nm, with intensities I_{Cr} and I_{Fe} , respectively. Calibration curves are for samples submerged under water (full symbols ■) and for samples in air (open symbols □). LOD, limit of detection.

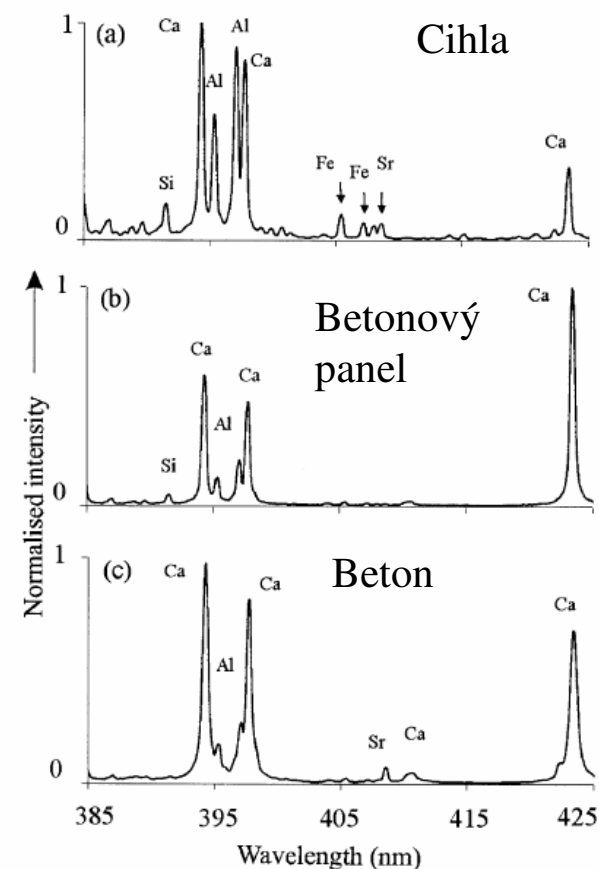


Fig. 6. LIBS spectra obtained for different 'stone' samples submerged under water; (a) brick; (b) pre-fabricated slab; and (c) concrete. Prominent elemental lines are indicated; spectra are normalised to the strongest line in each trace.

LIBS - analýza kapalin / v kapalinách

Table 1

Detection limits of selected elements (relative to Fe) in steel samples, measured in air and underwater, using the buffer gas flow—bare fibre head described in Section 2

Element	Analytical lines (nm)	Relative detection limits (in ppm)		
		Under water/Bare fibre	In air/Bare fibre	In air/Fibre with optics
Cr/Fe	427.48/426.04	310 ± 45	260 ± 25	150 ± 50^a
Cr II/Fe	283.65/283.24	$\sim 400^b$	305 ± 33^c	—
Si/Fe	288.16/283.24	455 ± 55	450 ± 45^d	380 ± 90^a
Mn/Fe	403.08	325 ± 48	405 ± 26^c	210 ± 70^a
	403.31/404.58		270 ± 25	
	403.45			

Laser power density on target: $I_T \cong 0.15 \text{ GW/cm}^2$. For comparison, data obtained with a fibre probe set-up with focussing optics (see Ref. [9]) are included for comparison.

^a Data from Ref. [9].

^b Estimate, no full calibration curve constructed.

^c Data from Ref. [17], based on multivariate analysis.

^d Data from Ref. [13].

LIBS

LIBS jako doplňující detekční metoda

- Detekce stopových prvků v rostlinách

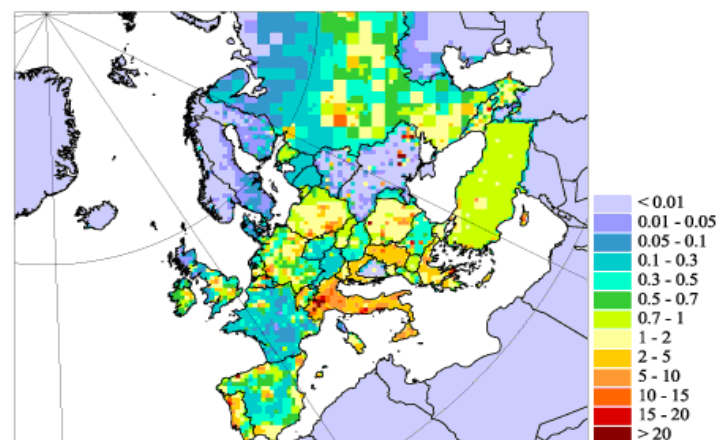
LIBS - Detekce stopových prvků v rostlinách

Detekce stopových prvků v rostlinách

Motivace:

Jedním z problémů v oblasti **rostlin s hyperakumulačními** vlastnostmi (jedná se o rostliny, které akumulují většinu toxických kovů jako je např. olovo, měď, kadmium atd.) je nedostatek informací o transportu iontů těchto kovů a o tom, ve které části rostliny se tyto kovy koncentrují. Současné analytické metody, používané na zjišťování výskytu zmíněných prvků v rostlinách, neumožňují přesné plošné nebo 3D rozlišení.

2001



Kadmium (3 g/km² y)

LIBS - Detekce stopových prvků v rostlinách

Detekce stopových prvků v rostlinách

Vzorky

- Listy, části stonků a kořenové části různých rostlin (většinou slunečnice) pěstovaných v kontrolovaných podmínkách (v laboratoři).
- Těžké kovy se přidávají v předem určených koncentracích ve formě roztoků do vyživovací směsi rostlin.

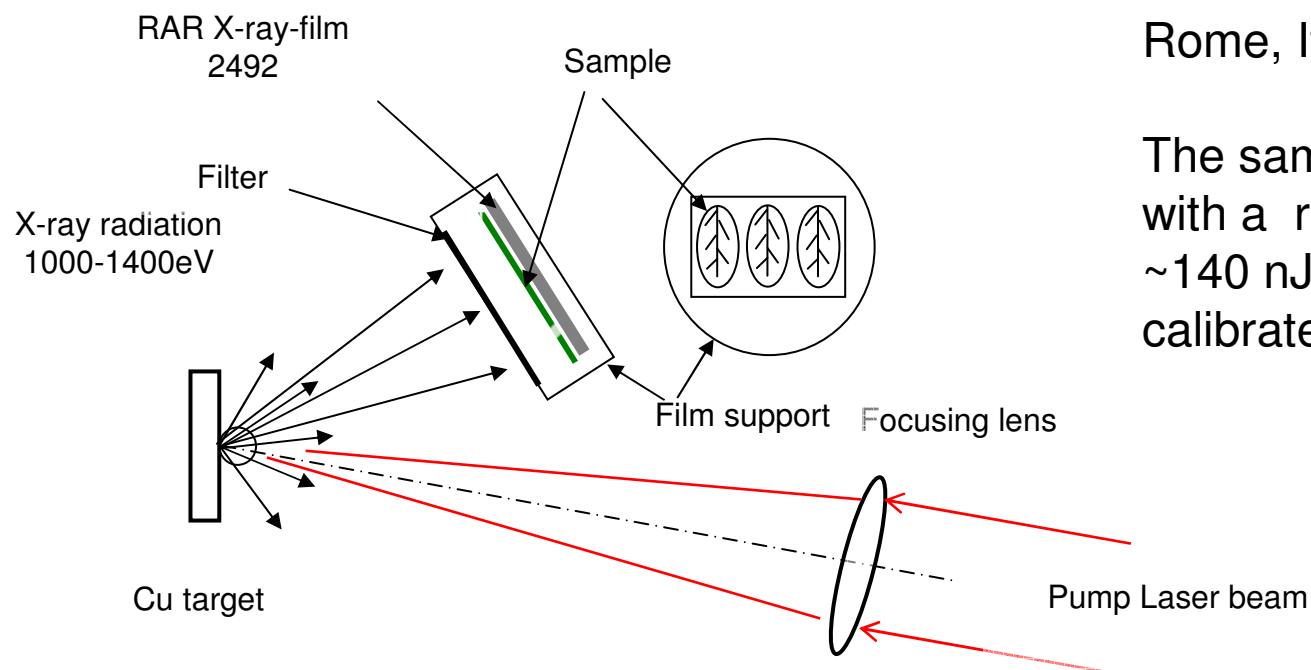


*University of
L'Aquila, Italy*

LIBS - Detekce stopových prvků v rostlinách

Použité detekční metody (kromě LIBS)

a) Rentgenová mikroradiografie



ENEA Frascatti,
Rome, Italy, Hercules source

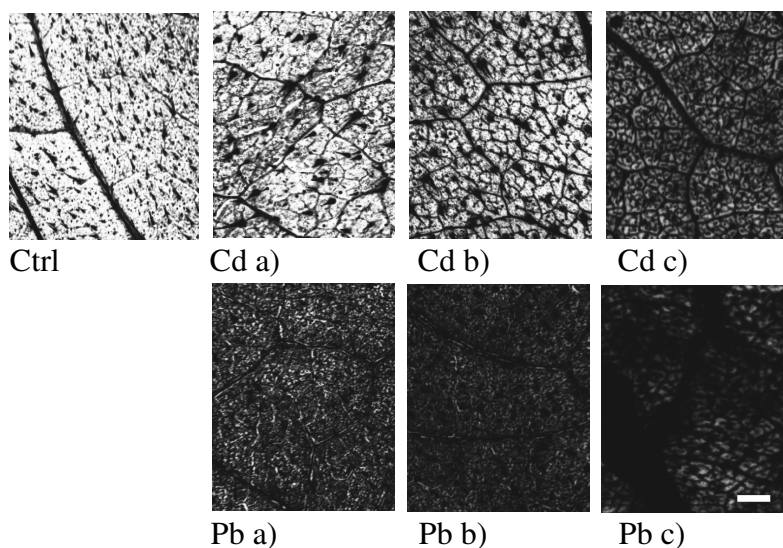


The sample was irradiated with a radiation of an energy $\sim 140 \text{ nJ/cm}^2$ (measured by calibrated PIN diode)

LIBS - Detekce stopových prvků v rostlinách

Použité detekční metody (kromě LIBS)

a) Rentgenová mikroradiografie



Radiography images of control (Ctrl) and for 10 days Cd or Pb treated *Helianthus annuus* samples with different concentration of contaminants a) 1 mM b) 5 mM and c) 10 mM. The length of the bar on image Pb c) is 400 μm .

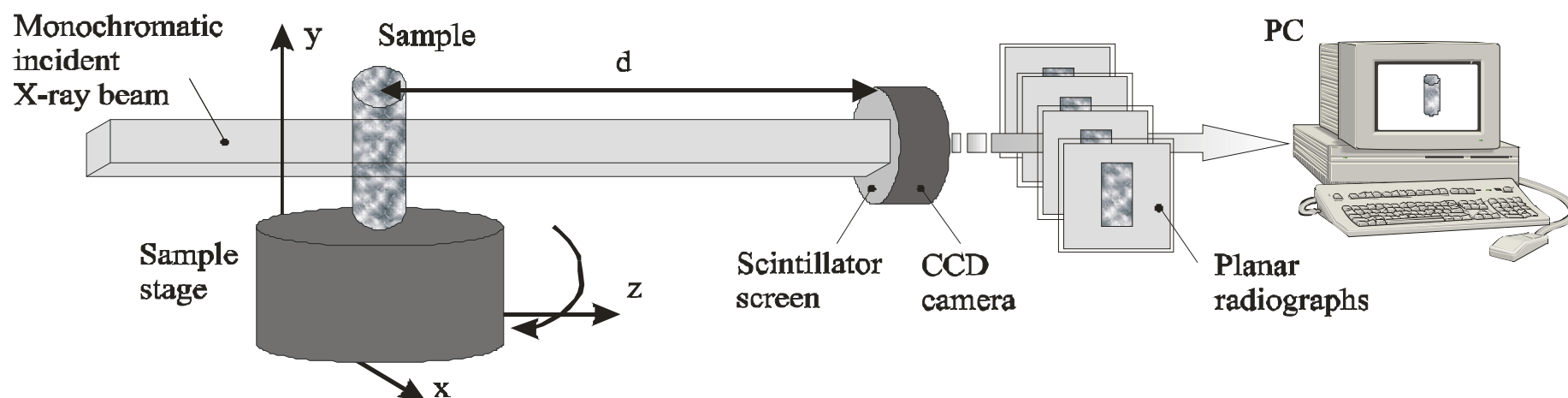
Concentration of the metal in the Hydroponic solution (mM)	Surface density of the metal in the leaves	
	Cd ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	Pb ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)
1	5.8	60
5	43	86
10	68	105

Values obtained from the densitometry analysis of the radiographs shown in upstairs.

LIBS - Detekce stopových prvků v rostlinách

Použité detekční metody (kromě LIBS)

b) Rentgenová mikrorotomografie



Elettra Synchrotron, Trieste, Italy

SYRMEP beamline

Energy range

8-40 keV, precision 0.002 keV

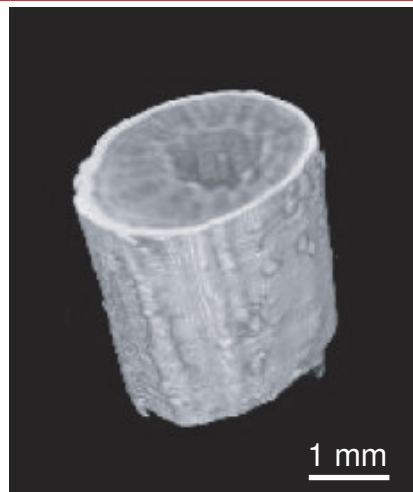
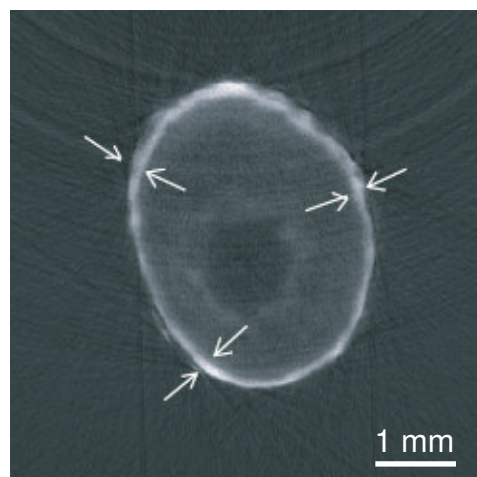
Detection: 16 bit CCD camera

Pixel size 5 μ m.

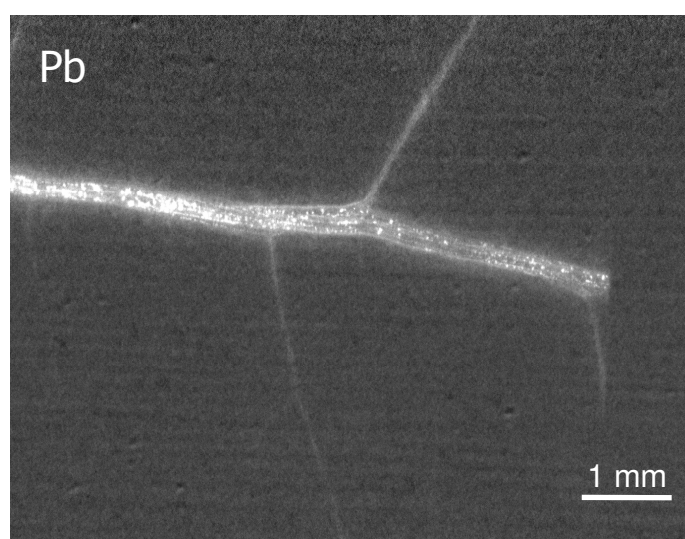
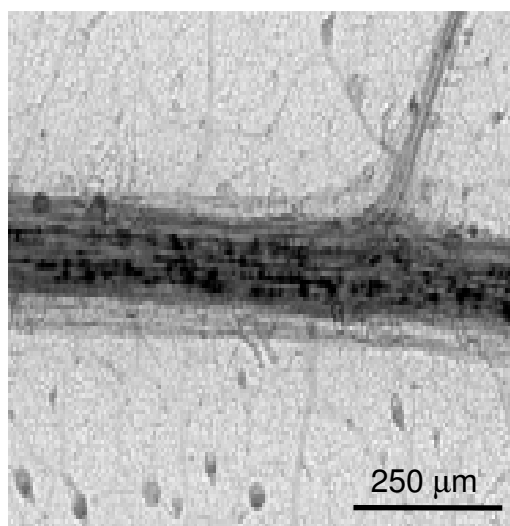
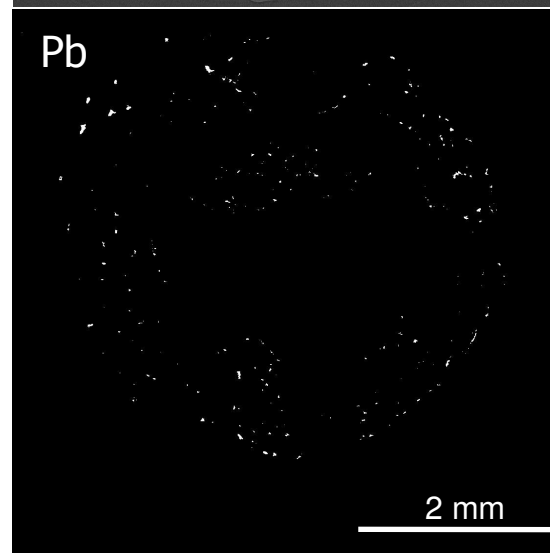
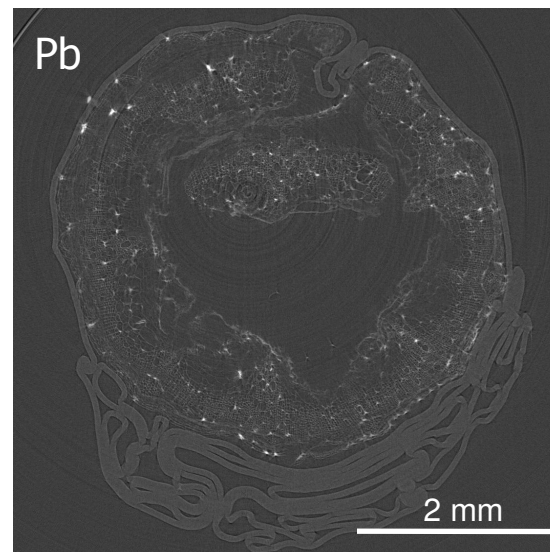


LIBS - Detekce stopových prvků v rostlinách

Použité detekční metody (kromě LIBS) b) Rentgenová mikrorotografie



Cu

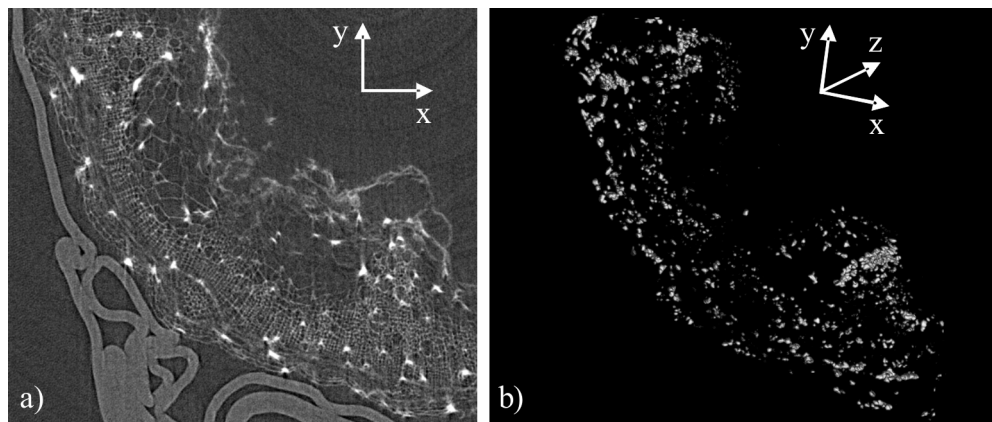


KAISER, J. *et al.*: Eur. Phys. J. D **32**, (2005), 113–118.

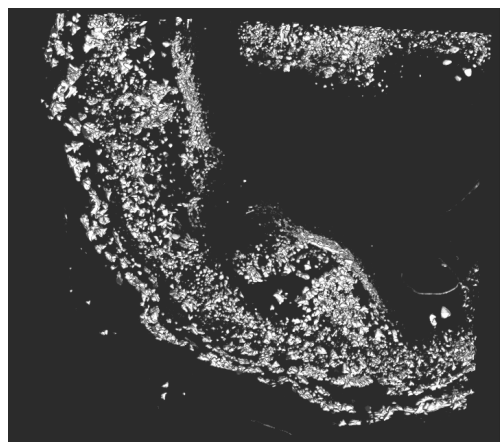
LIBS - Detekce stopových prvků v rostlinách

Použité detekční metody (kromě LIBS)

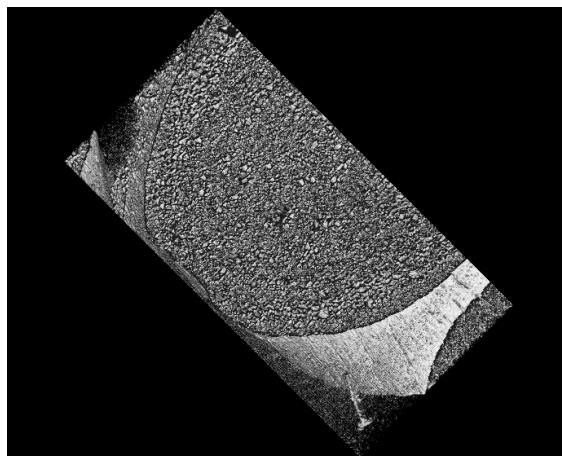
b) Rentgenová mikrorotografie



Slice of the *Helianthus annuus* root section (part) obtained by dual energy difference measurements (13.15 keV – 12.975 keV) together with the lead distribution in the appropriate volume of the sample.



The thickness of the reconstructed volume was ~ 1.5 mm (400 slices).



Slunečnice, kořenová část.

Kukuřice, kořenová část.

LIBS - Detekce stopových prvků v rostlinách

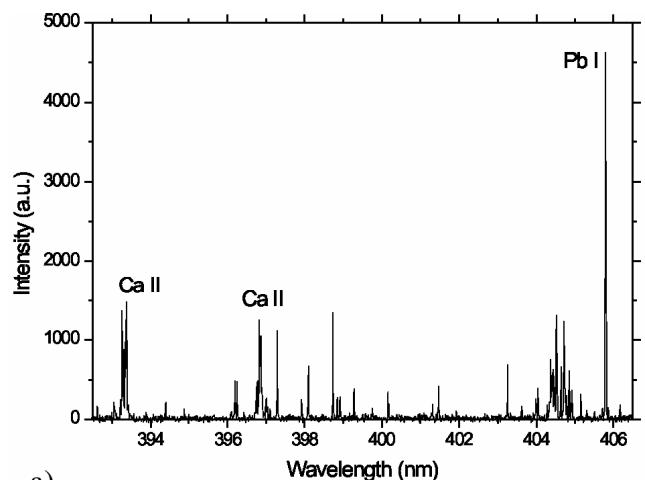
Proč LIBS?



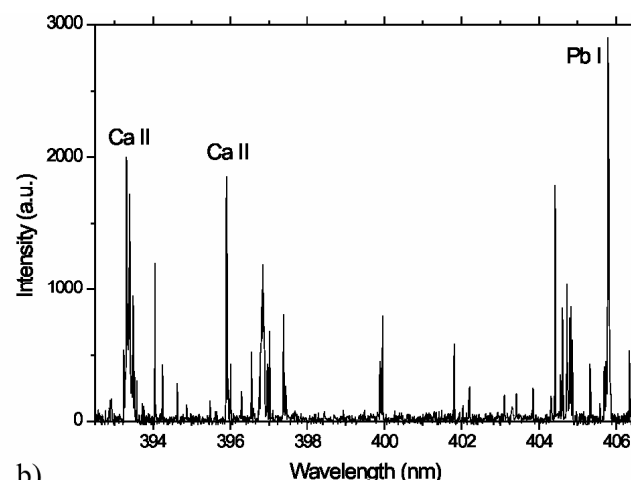
- LIBS umožňuje vysoké plošné rozlišení (plošné rozlišení je většinou limitováno jenom rozměrem fokusovaného laserového svazku) a hloubkové profilování (s přesností několik desítek nanometrů).
- Jedná se o (poměrně) levnou a dostupnou metodu.
- Lze ji aplikovat na velký počet vzorků (hodí se na předběžnou klasifikaci - výběr vzorků pro měření na synchrotron).
- Umožňuje víceprvkovou analýzu.
- Problém – kvantitativní analýza – nejsou „standardní“ vzorky.

LIBS - Detekce stopových prvků v rostlinách

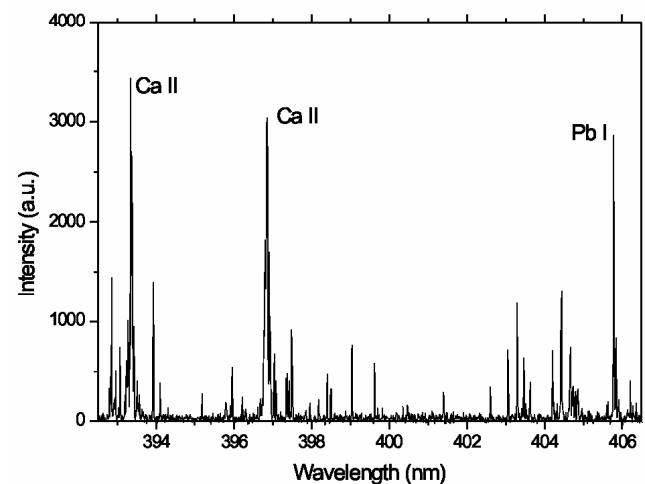
Detekce olova a kadmia



a)



b)

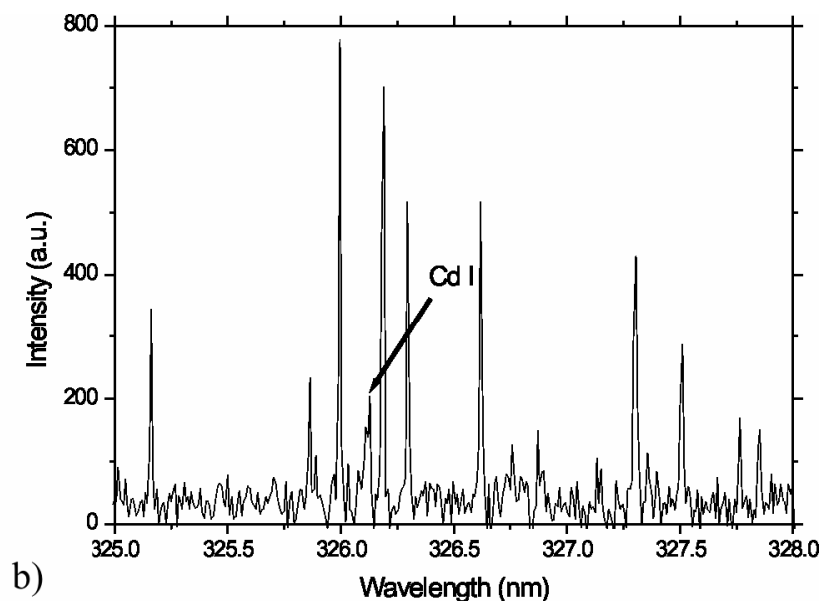
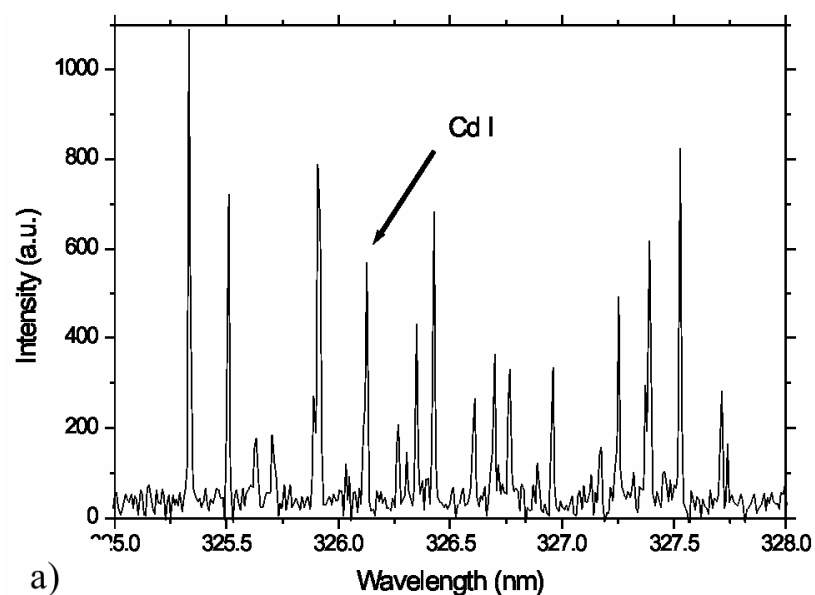


c)

LIBS spectra of 5 days 10 mM PbAc treated *Helianthus annuus* leaf sample. The laser was focused a) on the vein of the leaf and b) and c) outside of the vein 2 and 4 mm, respectively.

LIBS - Detekce stopových prvků v rostlinách

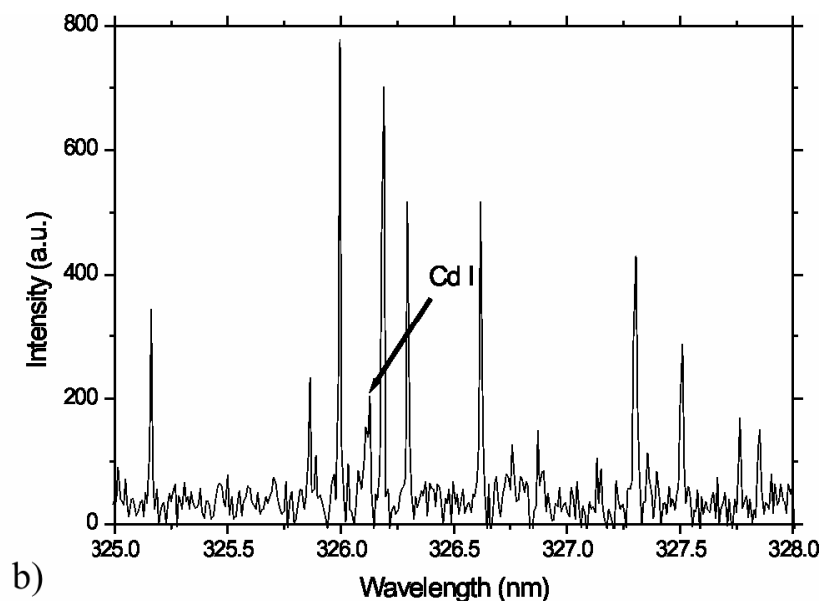
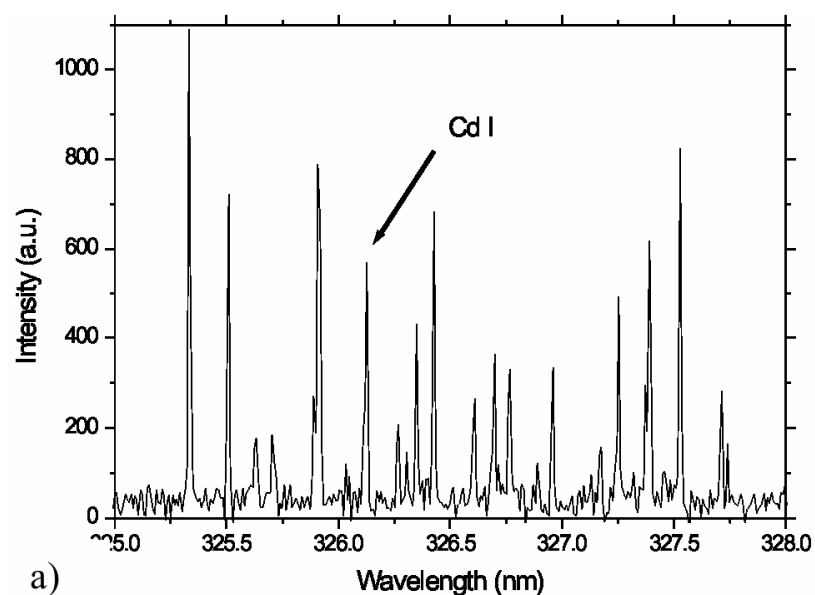
Detekce olova a kadmia



LIBS spectra of 5 days 10 mM CdAc treated *Helianthus annuus* leaf sample. The laser was focused a) on the vein of the leaf and b) about 1 mm outside of the vein.

LIBS - Detekce stopových prvků v rostlinách

Detekce olova a kadmia



LIBS spectra of 5 days 10 mM CdAc treated *Helianthus annuus* leaf sample. The laser was focused a) on the vein of the leaf and b) about 1 mm outside of the vein.

LIBS - Detekce stopových prvků v rostlinách

Detekce železa – fs LIBS

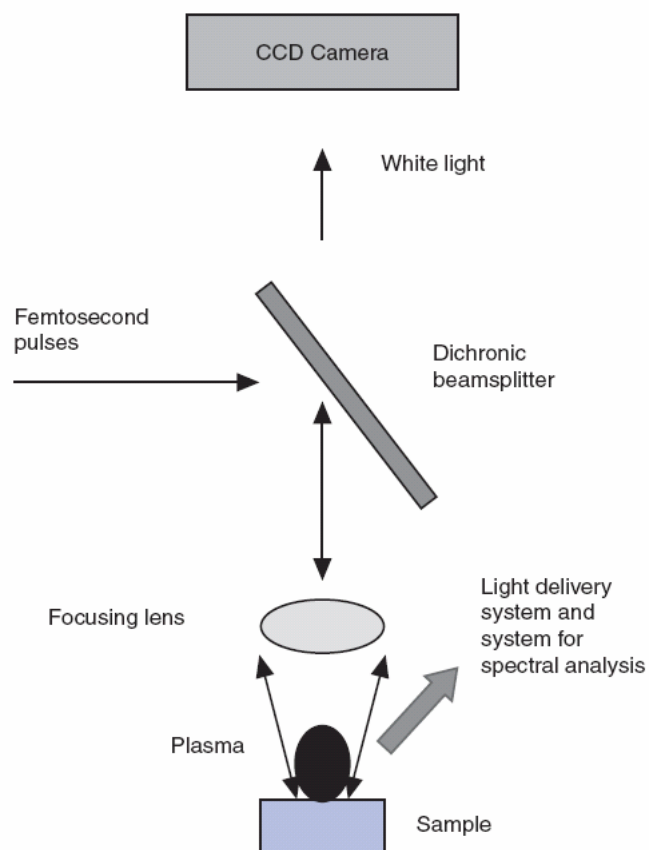


Figure 1 (online color at www.lphys.org) Schematic diagram of experimental setup

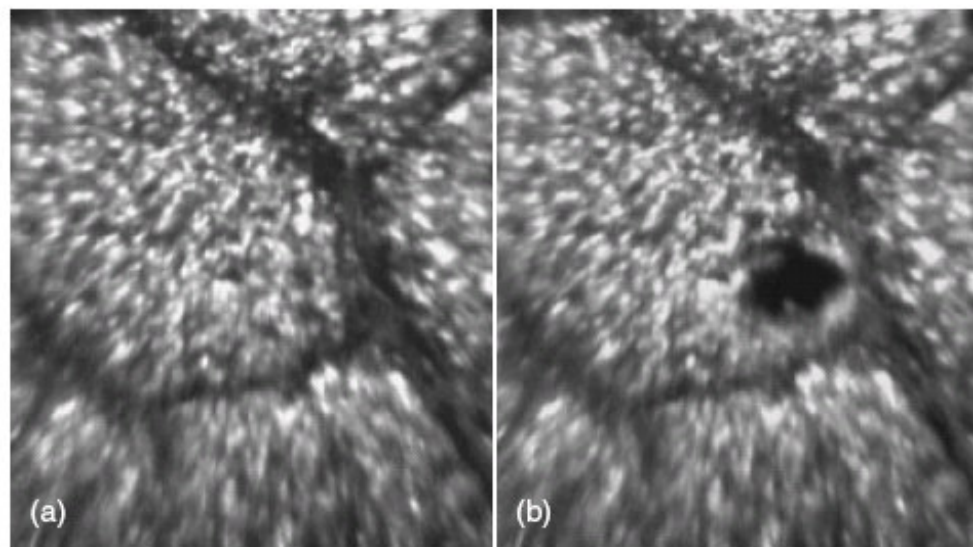
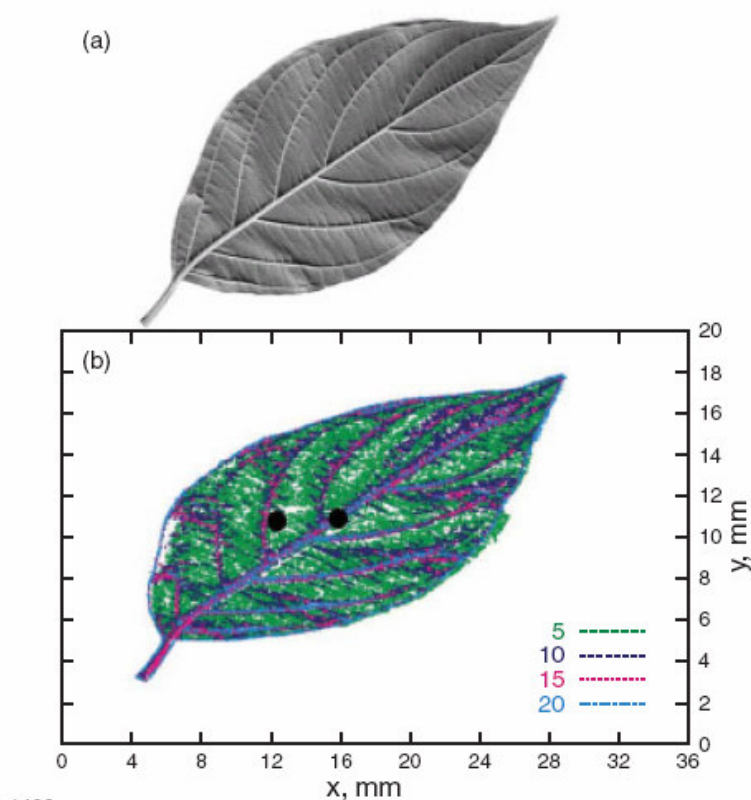


Figure 2 Demonstration of imaging/focusing capability of the experimental setup. a) shows a leaf sample before ablation; b) after ablation. The cell structure of the leaf is clearly visible. The crater diameter is about $70\ \mu\text{m}$

SAMEK, O. LAMBERT, J. HEGENRODER, R. LIŠKA, M. KAISER, J. NOVOTNY, K. KUKHLEVSKY, S.: Laser Phys. Lett. **3**, 2006, 21-25.

LIBS - Detekce stopových prvků v rostlinách

Detekce železa – fs LIBS



Relaxation Weighted Magnetic Resonance Imaging

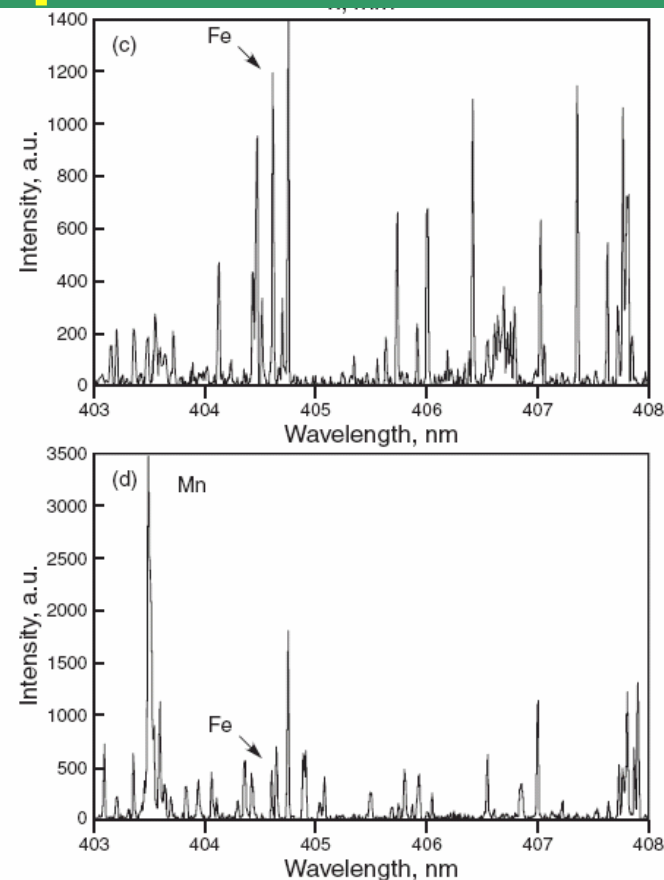


Figure 3 (online color at www.lphys.org) The sequence of Fe detection in cornus stolonifera. a) Photograph of a leaf sample used for analysis, b) standard distribution of Fe in the sample obtained using the RWMRI technique (the two ablation spots are indicated), Fe values are in ppm, c) LIBS spectra of vein – ablation spot on the right (diameter of the crater is about 100 μm , Fe concentration of about 20 ppm) - Fe spectral line is indicated, d) LIBS spectra of a spot which is about 2 mm away from the vein – ablation spot on the left (diameter of crater is about 100 μm , Fe concentration of about 5 ppm) - Fe spectral line is indicated

LIBS - Detekce stopových prvků v rostlinách

Detekce železa – fs LIBS

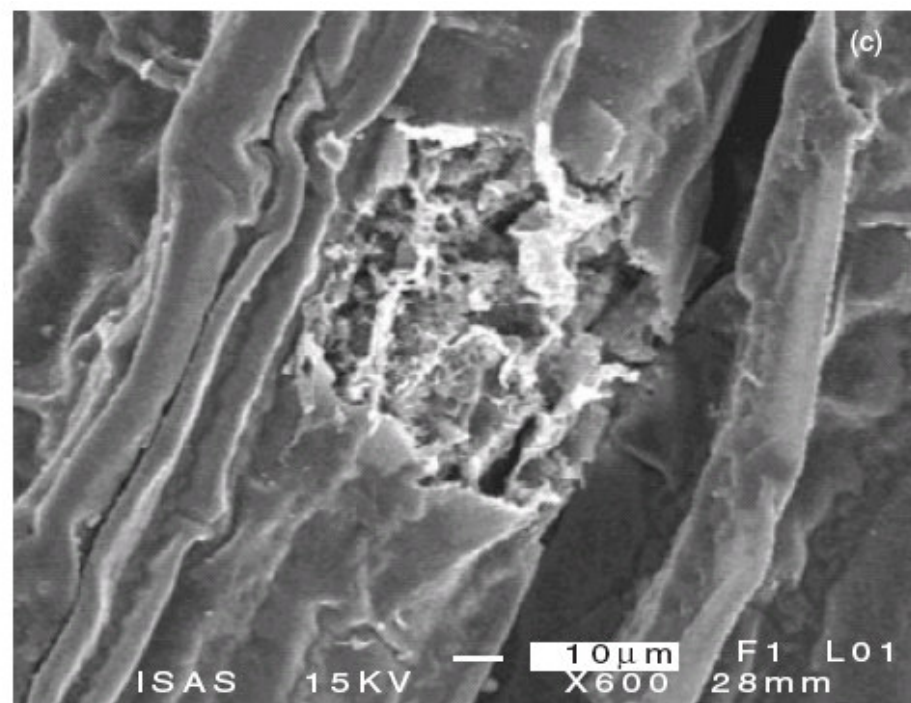
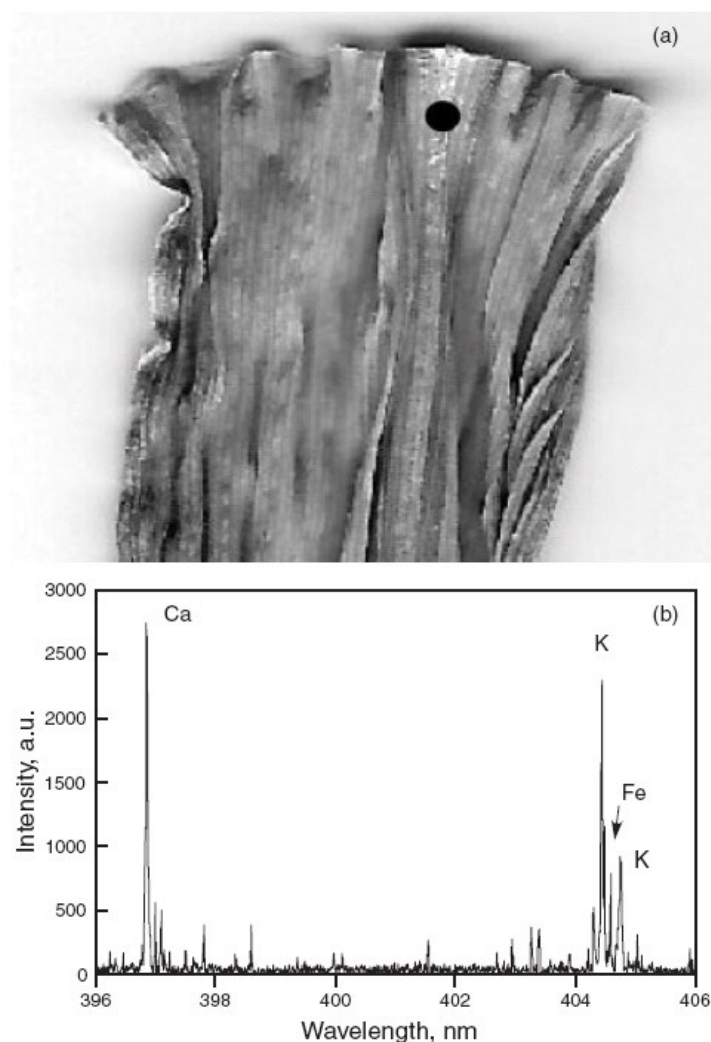
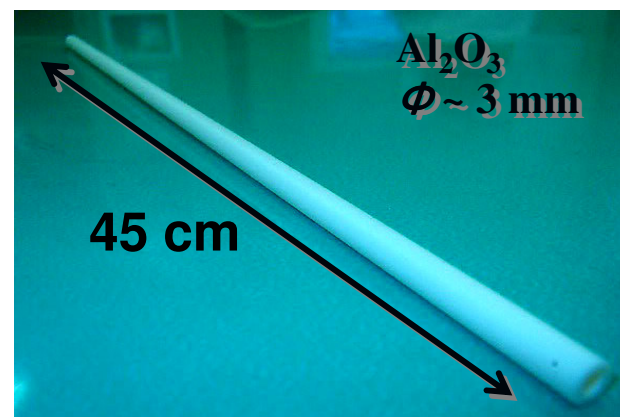
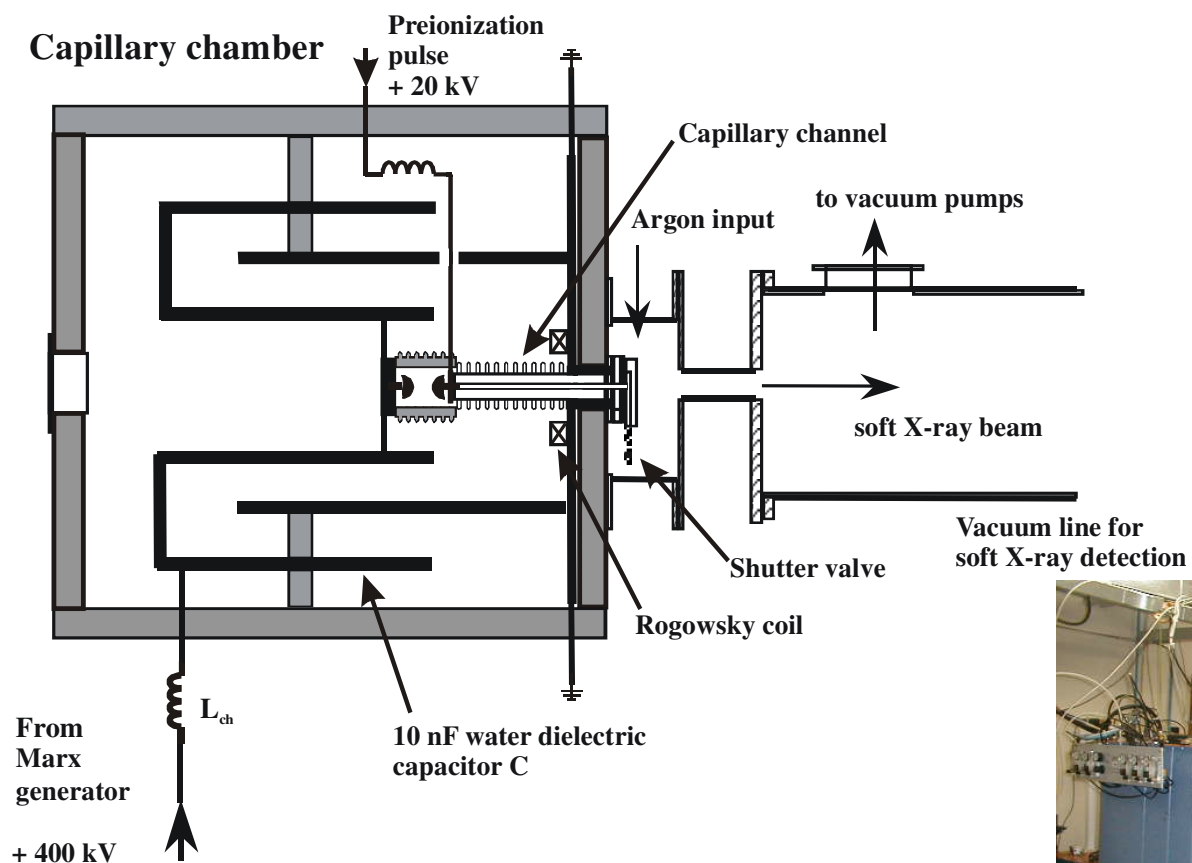


Figure 4 The sequence of Fe detection in maize sample. a) photograph of a sample used for analysis (dried maize leave samples were obtained from the University of Hohenheim), ablation spot is indicated using the black dot, b) LIBS spectra of ablated spot where the Fe concentration is of about 40 ppm (diameter of the crater is about 100 μm), Fe spectral line is indicated, c) image of ablated spot obtained with an electron microscope

LIBS

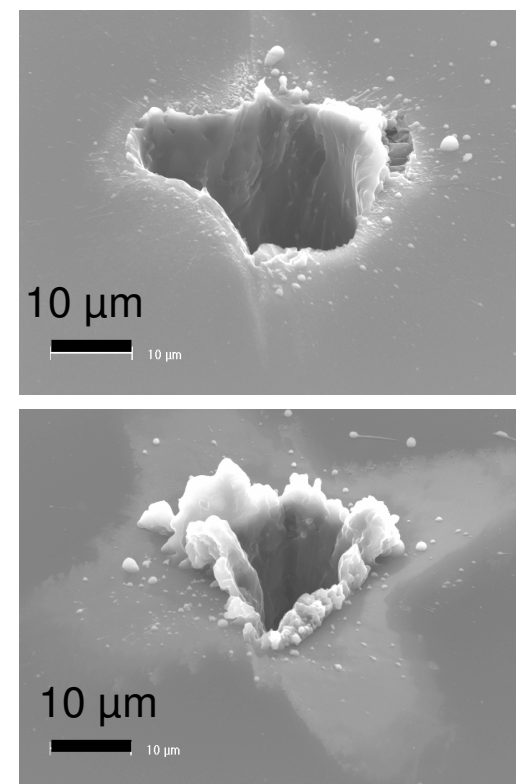
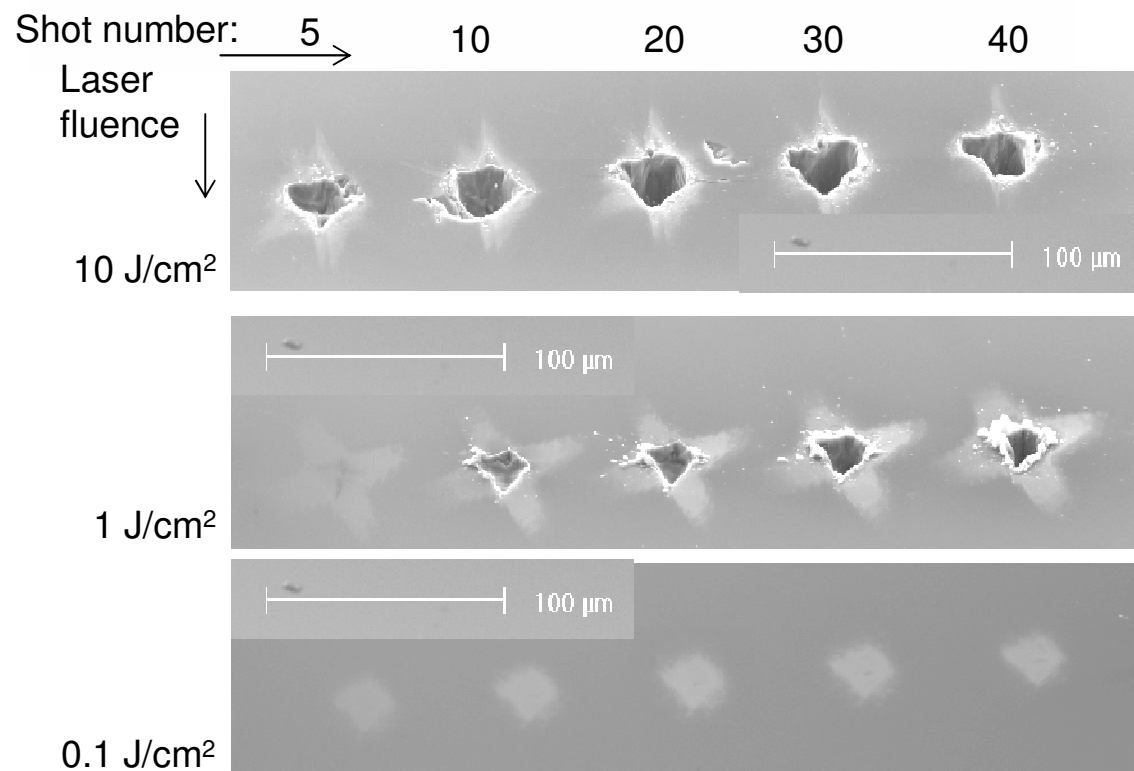
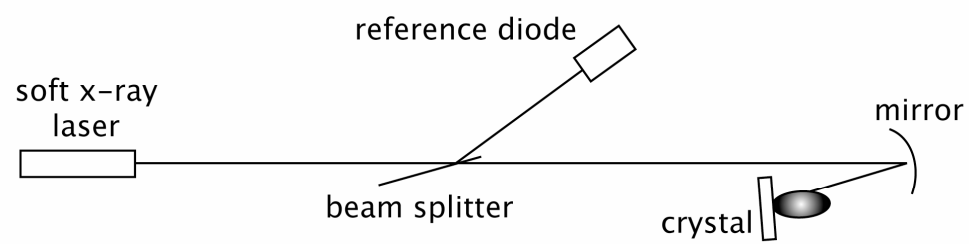
„LIBS“ s laserem vyzařujícím na 46,9 nm

LIBS - Laser

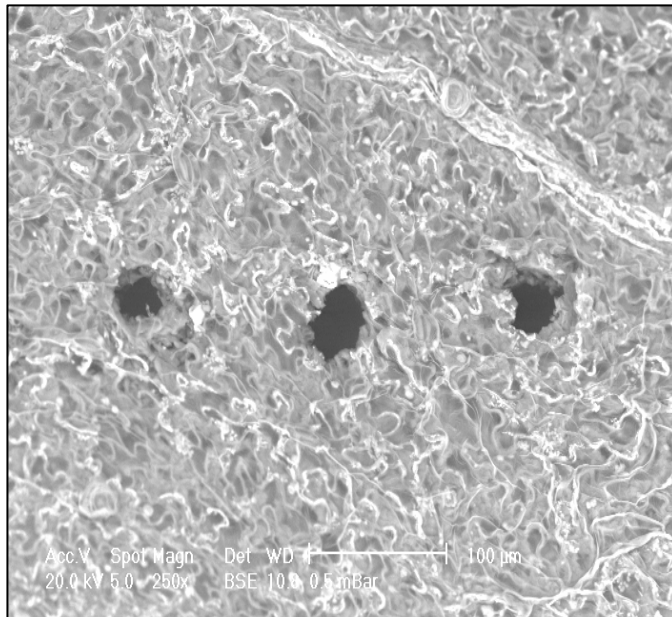
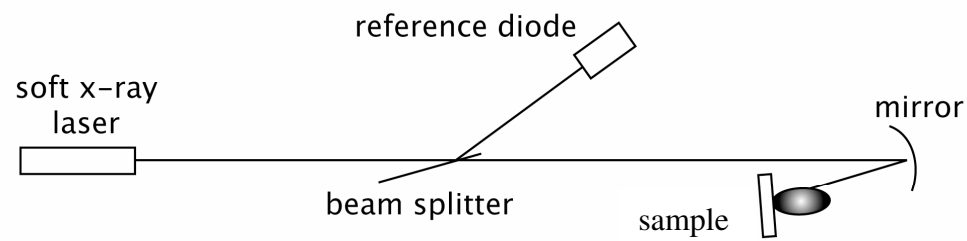


Experimentální zařízení využívající kapilárního výboje ke generaci laserového záření na vlnové délce 46,9 nm. Zařízení se nachází na University of L'Aquila, Itálie.

LIBS – První krok - ablace



LIBS – První krok - ablace



Příklad využití kapilárního laseru – vrtání děr do biologických struktur (na obrázku list Helianthus annuus). Rozměr zobrazených děr je ~ 20 μm.