



# alisi

Průvodce

aplikačními možnostmi

Ústavu přístrojové techniky

AV ČR, v. v. i.





Průvodce  
aplikačními možnostmi  
Ústavu přístrojové techniky  
AV ČR, v.v.i.



### Průvodce aplikačními možnostmi Ústavu přístrojové techniky AVČR, v.v.i.

Průvodce, kterého právě otevíráte, Vás seznámí s aplikačním potenciálem Ústavu přístrojové techniky AVČR, v.v.i. (dále ve zkratce ÚPT). ÚPT se již více jak 50 let věnuje výzkumným aktivitám zaměřeným na hledání fyzikálních metod a konstrukci přístrojových prvků pro diagnostiku a technologie v nanosvětě i makrosvětě. Současně se také jedná o instituci, která úspěšně spolupracuje s průmyslovou sférou a výsledkem této spolupráce byla řada unikátních přístrojů, často prvních svého druhu v České republice nebo i ve světě např. elektronové mikroskopy a později elektronový litograf, lasery a celé interferometrické systémy pro přesné odměřování, NMR spektrometry a kryogenní systémy. V posledních dvaceti letech se ÚPT orientuje zejména na hledání a zdokonalování nových fyzikálních metod v tradičních oblastech svého působení a to v celé šíři problému, od jeho teoretického popisu po realizaci unikátních přístrojových celků. Naše aktivity pokrývají:

- využití elektronových svazků k zobrazování, diagnostice, litografii a ke svařování,
- návrh nových sekvencí pro magnetickou rezonanční tomografii a jejich využití k detekci chemických změn v živých organismech včetně člověka,
- měření tepelného vyzařování či absorpce materiálů za velmi nízkých teplot, návrh kryogenních systémů,
- technologie nanášení tenkých vrstev,
- snímání a zpracování biosignálů v lékařství,
- využití laserových svazků ke svařování, ve spektroskopii, k přesnému měření vzdáleností a indexu lomu plynů, k manipulacím s mikrobjekty a nanoobjekty.

S ohledem na své výsledky ÚPT uspěl v náročné konkurenci a získal v roce 2010 dotaci ve výši 432 941 962 Kč na realizaci Aplikačních a vývojových laboratoří pokročilých mikrotechnologií a nanotechnologií (ve zkratce Alisi), které významně rozšíří a modernizují výzkumné zázemí ÚPT. Následující stránky Vás seznámí detailněji s vybranými aplikačními aktivitami ÚPT.

prof. RNDr. Pavel Zemánek, Ph.D.  
zástupce ředitele ÚPT

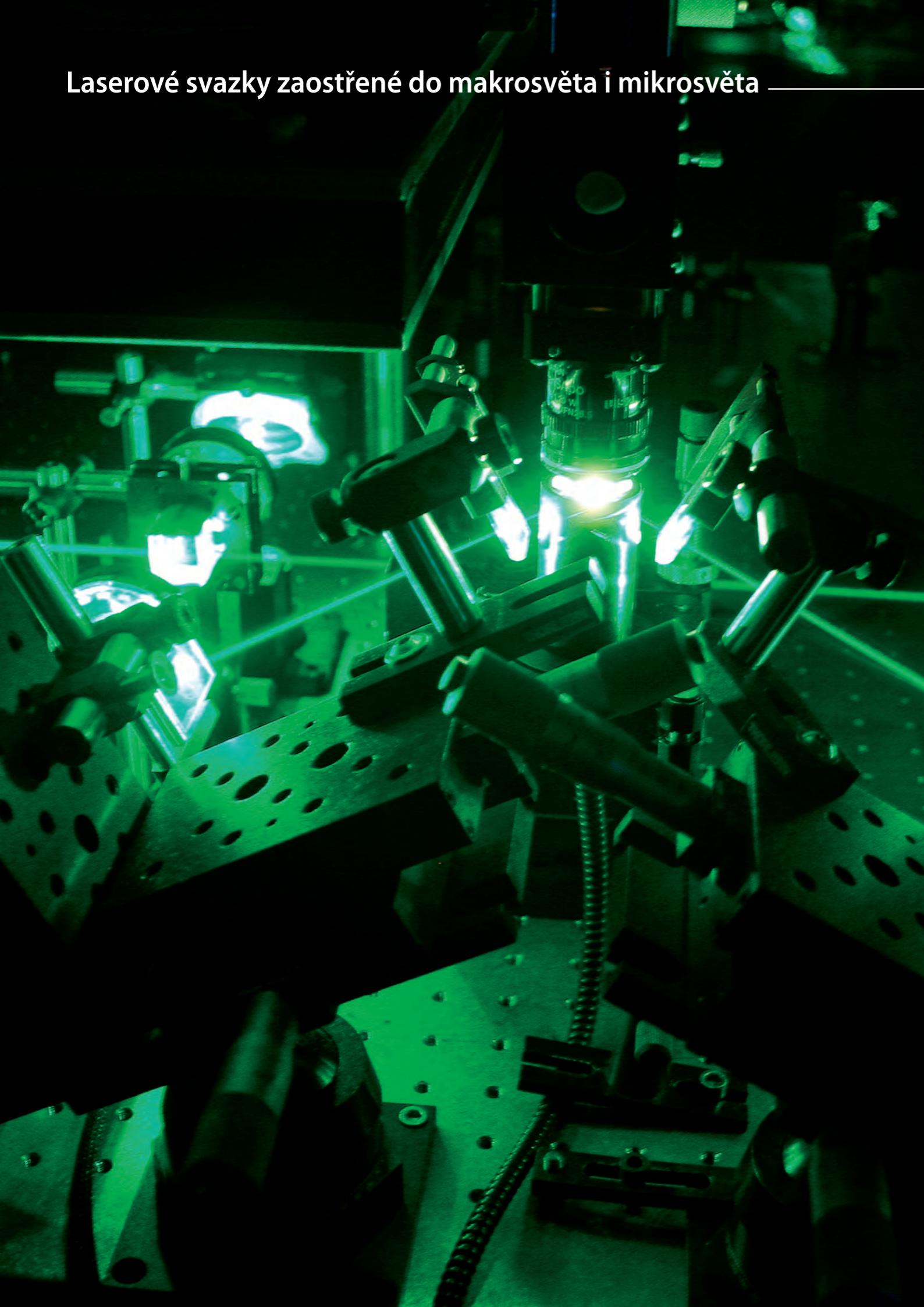
V Brně 20. 3. 2010



## Obsah



<b>Laserové svazky zaostřené do makrosvěta i mikrosvěta</b> .....	8
Applikace spektroskopické techniky LIBS .....	9
Ramanovská laserová spektroskopie .....	11
Optické mikromanipulační techniky .....	12
<b>Speciální technologie</b> .....	14
Svařování elektronovým svazkem .....	15
Vakuové pájení a žíhání .....	17
Vývoj a výroba vakuových průchodek .....	18
Depozice tenkých vrstev magnetronovým naprašováním .....	19
<b>Enviromentální elektronová mikroskopie</b> .....	20
Enviromentální rastrovací elektronová mikroskopie a detekční systémy .....	21
<b>Kryogenika a supravodivost</b> .....	26
Nízkoteplotní termometrie .....	27
Návrhy a realizace kryogenních systémů .....	28
Stanovení tepelně radiačních vlastností materiálů .....	29
Vakuová technika .....	30
Stacionární magnetická pole .....	30
Konzultace a školení o bezpečnosti v oblasti kryogenní techniky .....	30
<b>Lasery pro měření a metrologii</b> .....	32
Lasery s vysokou koherencí pro měřicí účely .....	33
Výkonové ECL lasery .....	35
Laserové etalony optických frekvencí .....	35
Absorpční kyvety pro spektroskopii a optické frekvenční etalony .....	38
Laserové interferometrické měřicí systémy .....	39
Speciální elektronika a software .....	41
<b>Elektronová litografie</b> .....	42
Elektronová litografie .....	43
<b>Pracoviště pro výzkum pokročilých výkonových laserových technologií</b> ..	44
Pokročilé výkonové laserové technologie .....	45



Využití optických metod k diagnostice látek nalézá v poslední době řadu nových aplikací od biologie až po jaderný průmysl. Mezi výhody těchto metod patří zejména **rychlé a bezkontaktní měření**, analýza výsledků **v reálném čase** a relativně **nízké pořizovací náklady**. Optické metody umožňují určit **prvkové složení vzorku** a rovněž **typy chemických vazeb** (např. u organických vzorků) s prostorovým rozlišením od **jednotek mikrometrů po desítky metrů**.

*Sestava pro optické třídění mikroobjektů (str. 8).*

Skupina *optických mikromanipulačních technik* nabízí zkušenosti:

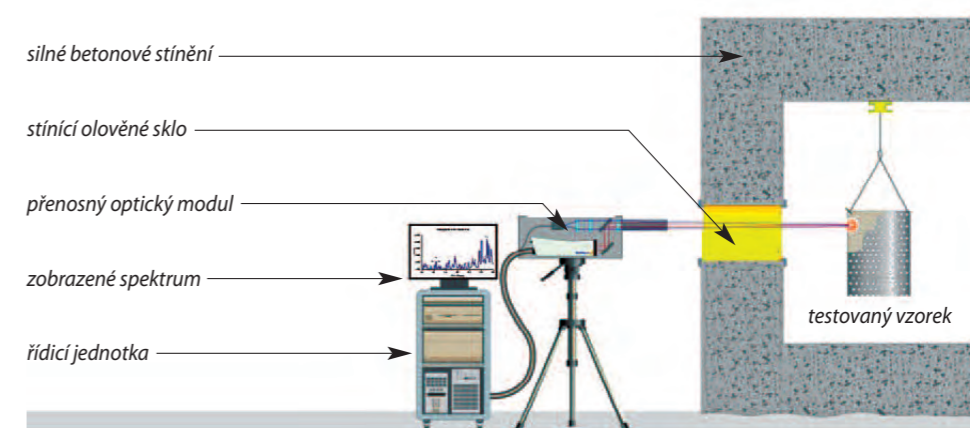
- v oblasti konstrukce unikátních přístrojů pro diagnostiku, které využívají spektroskopie laserem buzeného plazmatu (LIBS) a Ramanovu spektroskopii,
- v oblastech využití fokusovaných laserových svazků v mikrosvětě k bezkontaktnímu přemísťování mikroobjektů a jejich třídění, k vytváření mikrostruktur fotonopolymerací, k modifikaci povrchů či objemů struktur laserovou (mikro)ablací,
- v hledání nových metod identifikace mikroorganismů, jejich separace či destrukce.

### Aplikace spektroskopie laserem buzeného plazmatu LIBS

Ve všech oborech roste zájem o experimentální metody, které umožňují okamžitou interpretaci výsledků. Tento zájem úzce souvisí s požadavky průmyslu na rychlé a přesné vyhodnocení daného stavu materiálu nebo okamžité určení jeho parametrů a složení bez časově náročných laboratorních metod. Pro účely rychlé materiálové analýzy se přímo nabízí spektroskopie laserem buzeného plazmatu, označovaná ve zkratce LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy), která využívá pulzní lasery s výstupní energií svazku menší než 1 J/pulz. Tato metoda je založena na interakci laserového pulzu s povrchem vzorku, během které dodaná energie odpaří (ablatuje) malé množství materiálu a vytvoří svítící plazma, v jehož záření jsou obsaženy spektrální čáry odpařených prvků. Spektrum je snímáno spektrometrem, analyzováno a výstupem je informace o prvkovém složení ablatovaného materiálu. Detekční limity se pohybují od jednotek do stovek ppm (w/w).

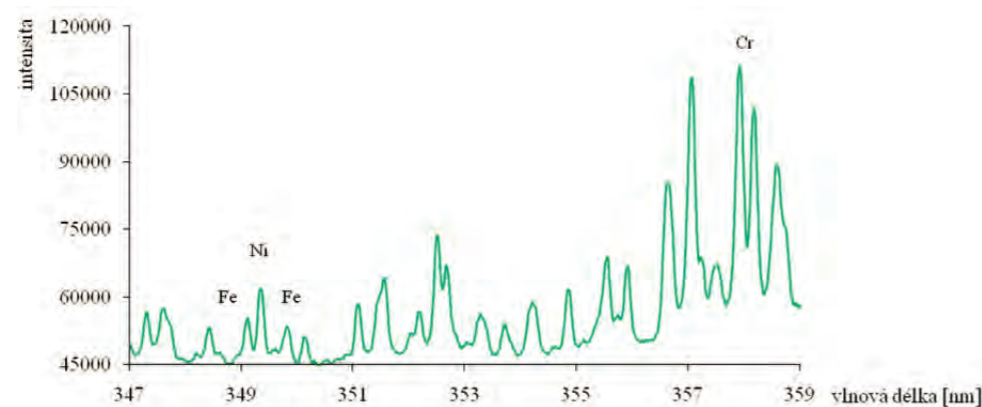
**Výhody a aplikační příklady metody LIBS:**

- Jednoduchost a pružnost LIBS předurčují k vyšetřování přímo **na místě u sledovaného objektu**, tedy i v určité fázi výrobního procesu nebo v určitém období provozu zařízení. Měření probíhá **vzdušnou cestou** a vyžaduje pouze „viditelný“ kontakt se vzorkem.

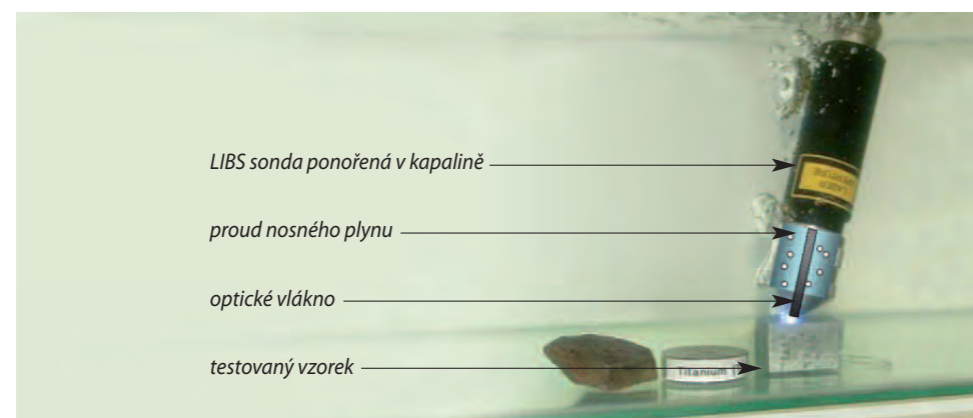


*Schéma měření složení materiálu vzdušnou cestou přes olovnaté sklo.*

- Aparatura může být **mobilní**, může využívat vhodný systém optických vláken k vedení laserových pulzů ke vzorku a obráceným směrem přenášet získaný optický signál do spektrometru. Mobilní aparaturu lze především využít na velké nepřemístitelné vzorky nacházející se v **těžce přístupných prostředích** nebo **zdraví ohrožujících provozech** (např. v prostředí jaderných reaktorů, chemických podniků, oceláren, zpracování odpadů).
- Dostupné rozlišení umožňuje **identifikovat druhy ocelí** (např. FV520, NAG, 17/4 a 18/13) podle zastoupení důležitých prvků, např. Mo, Ni, Ti.



- Mobilní i statické systémy lze použít k **monitorování životního prostředí**.
- Vzorky mohou být **ponoženy v tekutinách nebo roztocích** a analyzovány přímo na místě v reálném čase a bez zdlouhavé manipulace a dopravy do laboratoře.

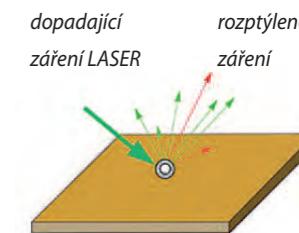


- Běžně detekuje prvky jako Be, U, I, Al, C, Ca, Mg, Cr, Pb, Si, Li, Hg, Sr, Rb, Ti, Fe, Ni, V, Mn, Mo a další.
- Umožňuje analyzovat **velmi malé vzorky** pomocí svazku zaostřeného na vzorek do stopy o rozměru **desítek mikrometrů**, nebo **velké vzorky vzdálené desítky až stovky metrů** od aparatury (např. sedimenty uvnitř skladovacích nádrží, ocelové konstrukce, aj.).

**Kontakt:** Mgr. Ota Samek, Dr., ■ e-mail: osamek@isibrno.cz ■ tel: 541 514 127  
**Podrobnější informace:** <http://www.isibrno.cz/omitec>

### Ramanovská laserová spektroskopie

**Ramanovská spektroskopie** je nedestruktivní technika, která je založena na osvětlení vzorku zářením o určité vlnové délce a detekci záření na jiných vlnových délkách, vzniklého rozptylem ve vzorku. Toto velmi slabé rozptýlené záření obsahuje informace o vibracích atomů v chemických vazbách zastoupených ve vzorku. Spektrální analýza trvající řádově minuty umožňuje identifikovat tyto chemické vazby a odlišit vzorky s různým zastoupením např. DNA, RNA, tuků, cukrů, pigmentů, sacharidů, amidů atd. Ozářený objem vzorku určuje prostorové rozlišení, s jakým lze tyto informace získat. Pomocí silně zaostřených laserových svazků lze získat informace o chemických vazbách obsažených ve vzorku o miniaturním (femtolitrovém) objemu. Přestože princip metody je známý více než sto let, v poslední době se metoda teprve začíná prosazovat v řadě unikátních aplikací především v důsledku rozvoje citlivých detektorů záření.

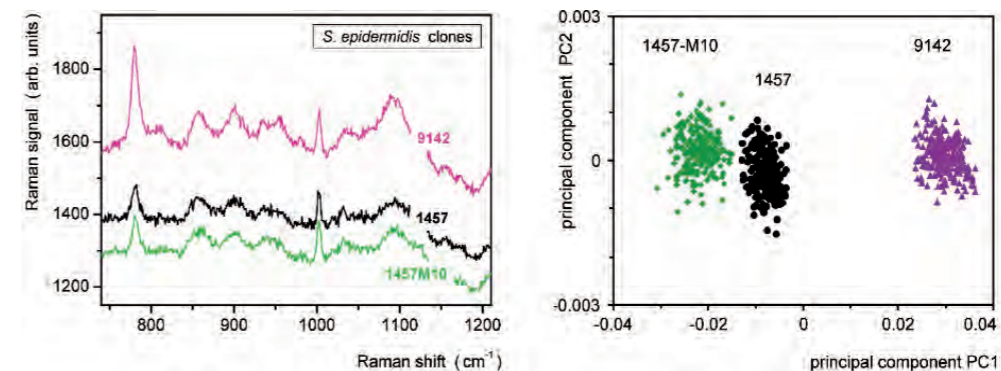


Princip ramanovské laserové spektroskopie:

- rozptýlené záření na stejné vlnové délce jako laser
- Ramanovské záření na jiných vlnových délkách – posuv vlnových délek je závislý na vlastnostech vzorku.

#### Výhody a aplikační příklady ramanovské spektroskopie:

- Umožňuje **rozpoznávání jednotlivých druhů mikroorganismů nebo typů biologických vzorků**. Lze od sebe odlišit i jednotlivé klony bakteriálních kmenů, např. *Staphylococcus epidermidis*, což má velký význam v lékařství pro diagnostiku bakteriální infekce již během ambulantní návštěvy pacienta.



Příklad ramanovských spekter tří klonů (odlišených barvou a číslem) bakteriálního kmene *S. epidermidis* (vlevo).

Příklad zpracování ramanovského spektra vedoucího k rozlišení bakterií, které nevytvářejí (1457-M10) resp. vytvářejí biofilm (vpravo).

- Charakterizuje a **rozpoznává biofilmy** v reálném čase, což umožní včas identifikovat riziko zdravotních komplikací pacientů s katetry či kloubními náhradami. Povrchy materiálů používané v lékařství se postupně pokrývají několika vrstvami často různých typů bakterií (biofilm), které jsou odolné vůči medikamentům a způsobují infekci.
- **Nedestruktivně analyzuje chemické složení farmaceutických výrobků** a umožňuje tak kontrolovat např. pravost léků v reálném čase.
- **Rozpoznává nádorové a zdravé tkáně/buňky** a nabízí se tak jako unikátní diagnostický nástroj pro onkologii jak in vivo (např. při včasné rozpoznání rakoviny kůže), tak in vitro (analýza odebraných buněk či tkání).
- **Umožní rozpoznávat buňky zasažené virovou infekcí.**
- **Vytváří chemickou mapu povrchů nebo identifikuje nanostruktury.**
- **Lze ji kombinovat s optickou pinzetou a aplikovat i na mikroorganismy volně plovoucí v kapalině.**

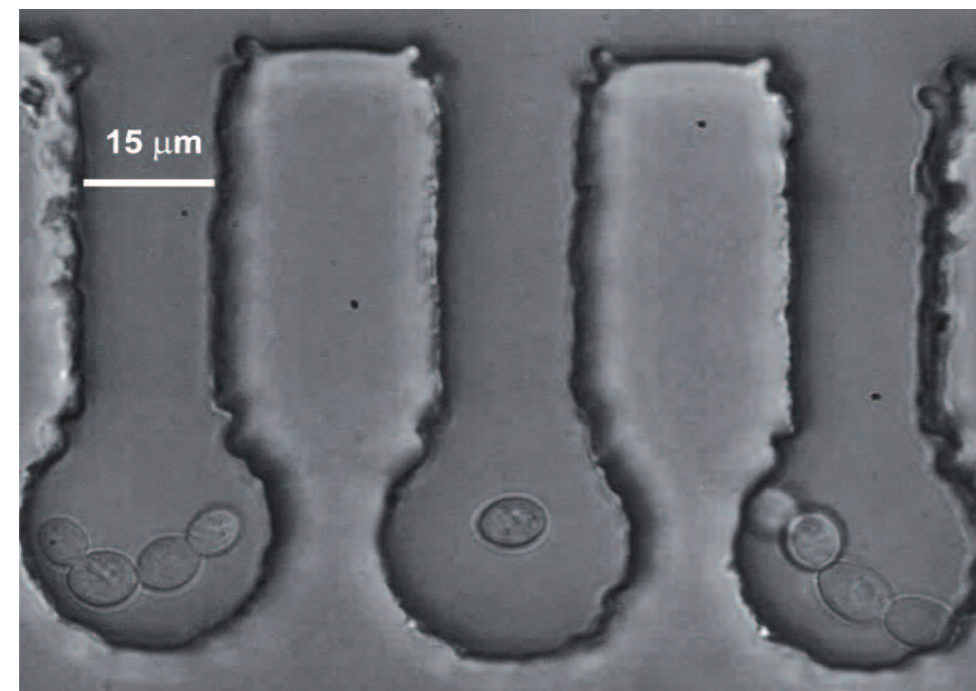
**Kontakt:** Mgr. Ota Samek, Dr., ■ e-mail: osamek@isibrno.cz ■ tel: 541 514 127  
**Podrobnější informace:** <http://www.isibrno.cz/omitec>

### Optické mikromanipulační techniky

Optické mikromanipulační techniky využívají mechanických účinků světla v průběhu změny směru jeho šíření při rozptylu na mikroobjektech. Tímto způsobem je možné prostorově ovlivnit pohyb objektů o rozměrech od desítek nanometrů po desítky mikrometrů pouhým osvětlením laserovým paprskem. Optická pinzeta – světelná analogie klasického mechanického manipulačního nástroje – využívá jediného ostře fokusovaného laserového svazku k bezkontaktnímu zachycení objektů. Protože objekty jsou zachyceny v blízkosti ohniska, způsobí změna jeho polohy i následný přesun objektů, tedy jejich řízenou mikromanipulaci. Více ohnisek rozmístěných v prostoru umožní zachytit a pomocí sofistikovaného řízení poloh ohnisek také přemístit více objektů současně. Nyní se tento nástroj používá převážně pro zachycení a přemísťování mikroobjektů v kapalném prostředí (živé mikroorganismy nebo buňky ve vodě či vhodném roztoku, mikroobjekty za průhlednými překážkami apod.). Protože tak malé objekty je možné pozorovat pouze s využitím optického mikroskopu, jsou oba systémy často kombinovány.

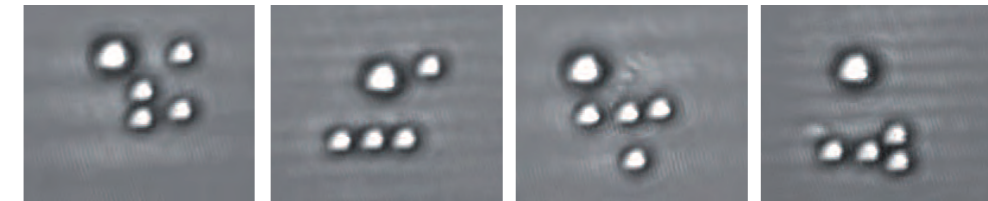
#### Aplikační příklady optických mikromanipulací:

- Byla vyvinuta **kompaktní verze** zařízení, která obsahuje integrovaný laser nebo adaptér na optické vlákno a umísťuje se mezi světelný mikroskop a objektiv. Není tedy nutné zasahovat do optické cesty komerčního optického mikroskopu, kterým jsou objekty pozorovány.
- Optická pinzeta bývá **kombinována s řadou optických spektroskopických technik** (např. ramanovskou mikrospektroskopií, fluorescenční spektroskopií), které umožňují bezkontaktně a nedestruktivně charakterizovat vlastnosti zachyceného mikroobjektu.
- Velmi perspektivní je kombinace optických mikromanipulačních technik s **mikrofluidními systémy** (lab-on-a-chip), např. pro studium stresu na úrovni jednotlivých buněk a pro následnou separaci buněk.



Ukázka mikrofluidní struktury komůrek s živými buňkami (kvasinkami). V krajních komůrkách jsou nestresované buňky, které se dělí, zatímco v prostřední komůrce je stresovaná buňka. Buňky byly do jednotlivých komůrek rozmístěny optickou pinzetou.

- Kromě silně fokusovaných svazků lze k optickému zachycení mikroobjektů použít i řady jiných konfigurací světelného pole, které např. umožňují **uspořádávání mnoha mikročástic** v prostoru nebo na povrchu do pravidelných struktur.
- Působit lze i na mikročástice v pohybu a dosáhnout usměrnění jejich stochastického pohybu v kapalině (např. v mikrofluidním systému) vedoucího až k **separaci různých složek suspenze** (nebo různých druhů buněk) pouhým osvětlením laserem.

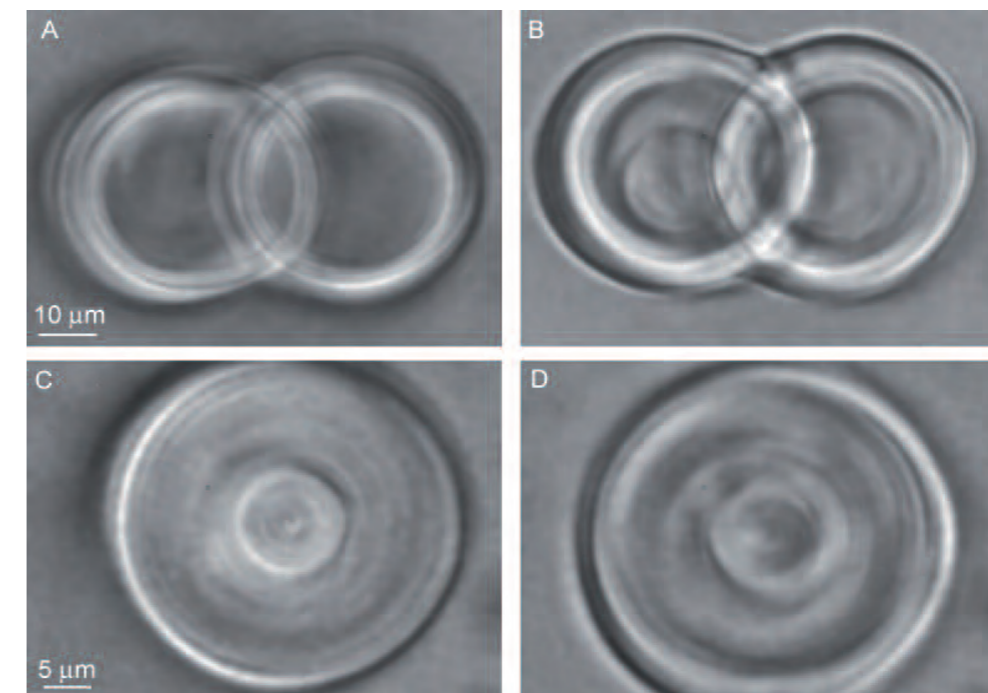


Příklad optického třídění částic podle velikosti – křemenné mikrokuličky o velikostech 2 μm a 3 μm se vlivem osvětlení světlem pohybují opačnými směry.

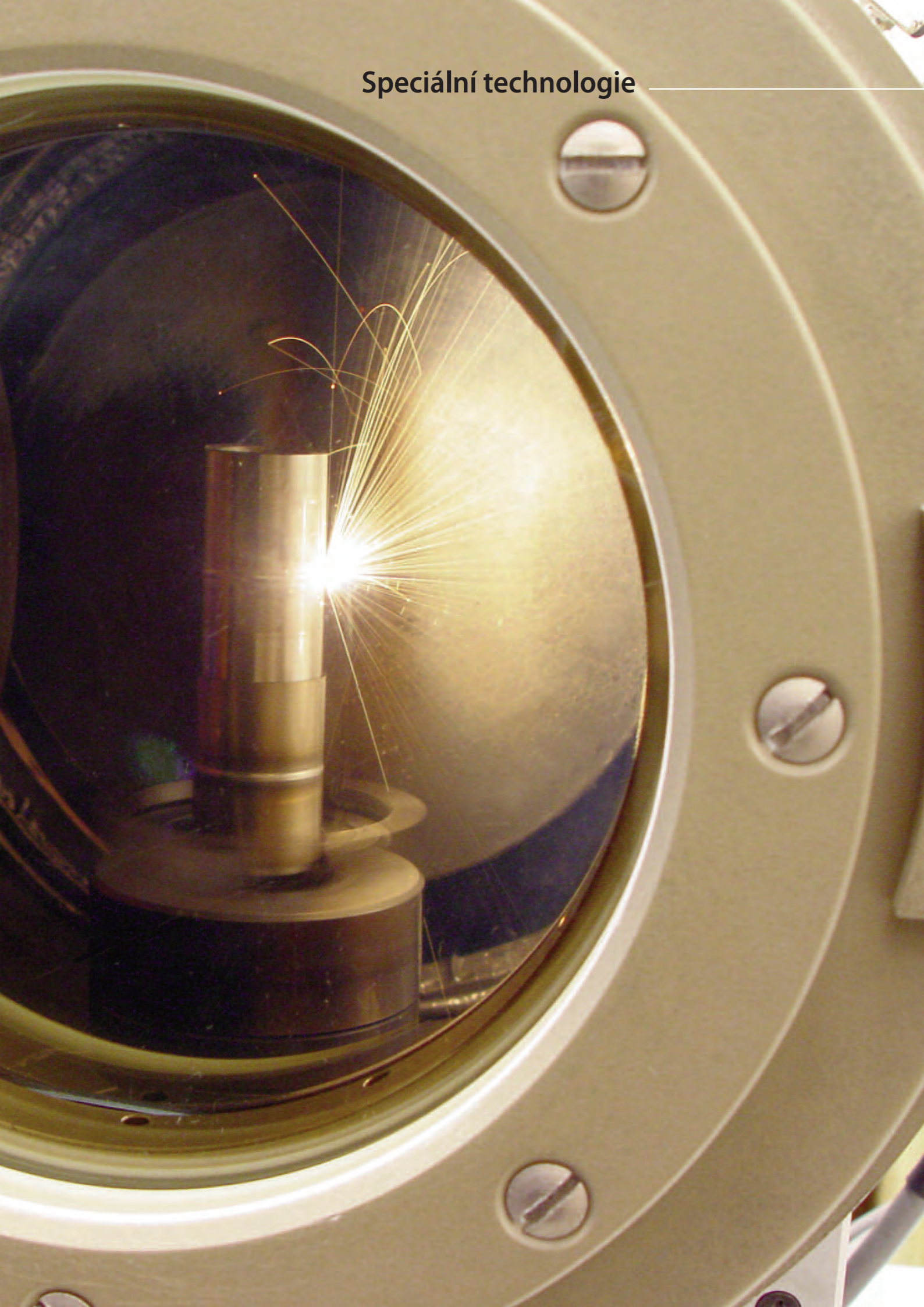
#### Aplikační příklady laserových svazků fokusovaných do stop o mikrometrovém průměru:

- Výrazný nárůst intenzity fokusovaného svazku v bezprostředním okolí ohniska lze využít k inicializaci fotopolymerace, tedy chemické reakce, během které z kapalného monomeru vznikne tuhý polymer. Pohybem ohniska laserového svazku v monomeru lze vytvářet i velmi komplikované mikrostruktury.
- Pulzní fokusované laserové svazky vhodné vlnové délky nabízejí řadu možností, jak využít jejich destruktivních účinků (mikroablace) k objemové či povrchové modifikaci objektů včetně zásahů uvnitř živých buněk.

**Kontakt:** prof. RNDr. Pavel Zemánek, Ph.D. ■ e-mail: zemanek@isibrno.cz ■ tel: 541 514 202  
**Podrobnější informace:** <http://www.isibrno.cz/omitec>



Příklad mikrostruktur vytvořených fotopolymerací. Tenká dutá do sebe vnořená vlákna měla tloušťku stěny 2 μm a byla dlouhá až několik centimetrů. Sloupce obrázků porovnávají tvar a rozměry protilehlých konců vláken vzdálené několik centimetrů.



Skupina *speciálních technologií* se zabývá:

- Vývojem technologií a konstrukcí technologických zařízení, která představují nezbytné zázemí pro stavbu *elektronově optických přístrojů* pracujících ve vakuovém, resp. ultravysokovakuovém prostředí. Mezi tyto technologie patří především **svařování a obrábění elektronovým svazkem, pájení ve vakuu, vývoj a výroba vakuových průchodek** apod.
- **Magnetronovým naprašováním**, kterým vytváří povlaky např. Al, Si, Mo, Ti, Ni, Ag, C, ITO, Nb, W, TiN, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, SiO<sub>2</sub> a jejich kombinací. Skupina zvládla přípravu multivrstevných systémů pro rentgenovou optiku, tvořených dvouvrstevnými nanometrovými tloušťkami o sumární tloušťce desetin mikrometru s přesností v oblasti desetin nanometru.
- **Otěrzdornou ochranou nástrojů** perspektivními povlaky uhlíku, nitridu uhlíku, nanostrukturovaných multivrstev a nanokompozitů na bázi uhlíku.
- **Charakterizací tvrdých otěrzdorných povlaků** dynamickým impaktním testerem (jako jedno ze dvou pracovišť v ČR).

*Svařování nerezové trubky pomocí elektronového svazku (str. 14).*

### Svařování elektronovým svazkem

Svařování elektronovým svazkem patří mezi tavné způsoby spojování materiálů a používá se k němu fokusovaný svazek elektronů s vysokou energií 30 keV až 200 keV. Při dopadu elektronů je jejich kinetická energie přeměněna v teplo, které lokálně ohřívá svařované součásti. Svařování probíhá zpravidla bez přídavného materiálu a v závislosti na parametrech aparatury lze na jeden průchod spojovat značné tloušťky materiálu. Celý proces probíhá ve vakuu o tlaku  $10^{-2}$  až  $10^{-3}$  Pa, které funguje jako „ochranná atmosféra“ umožňující svařovat i reaktivní kovy (např. Ti). Nelze však svařovat kovy s vysokou tenzí par (např. Zn, Cd, Mg). Přes vysokou finanční náročnost si elektronové svařování svými charakteristickými a unikátními vlastnostmi vydobylo pevné postavení v mnoha významných průmyslových odvětvích, jako např. v automobilovém, jaderném, kosmickém a leteckém průmyslu.

**K hlavním výhodám elektronového svařování patří:**

- vysoký poměr hloubky svaru k jeho šířce, blíží se hodnotě 25:1, a to s charakteristickým nožovým průřezem,
- hluboké průvary na jeden průchod (až desítky centimetrů),
- svařování kovových materiálů bez ohledu na jejich tavicí teplotu,
- minimální rozměr tepelně ovlivněné oblasti a následně i její minimální deformace,
- vysoká produktivita svařování,
- čistota svaru, vakuové přetavení kovu.

Pracoviště ÚPT je vybaveno třemi elektronovými svářečkami vlastní výroby, které mají válcovou komoru a manipulátor zajišťující rotaci a vertikální posuv svařované součásti. U všech aparatur může být poloha elektronového děla na komoře volena tak, že jeho osa je buď kolmá na osu rotačního manipulátoru nebo s ní rovnoběžná a je tedy možné provádět radiální nebo axiální svary. Technické parametry systémů jsou následující:

- Modernizovaná elektronová svářečka ES-2 s komorou o průměru 600 mm a hloubce 490 mm je vybavena elektronovou tryskou 50 kV/1,5 kW.
- Stolní elektronová svářečka SES-1 s komorou o průměru 235 mm a hloubkou 165 mm umožňuje zvětšit komoru pomocí nástavců a obsahuje elektronovou trysku 50 kV/1,5 kW. Svařenec je možné pozorovat v režimu rastrovacího elektronového mikroskopu (REM režim).



Modernizovaná elektronová svářečka ES-2, stolní elektronová svářečka SES-1 a experimentální stolní elektronová svářečka MEBW-60/2-E.

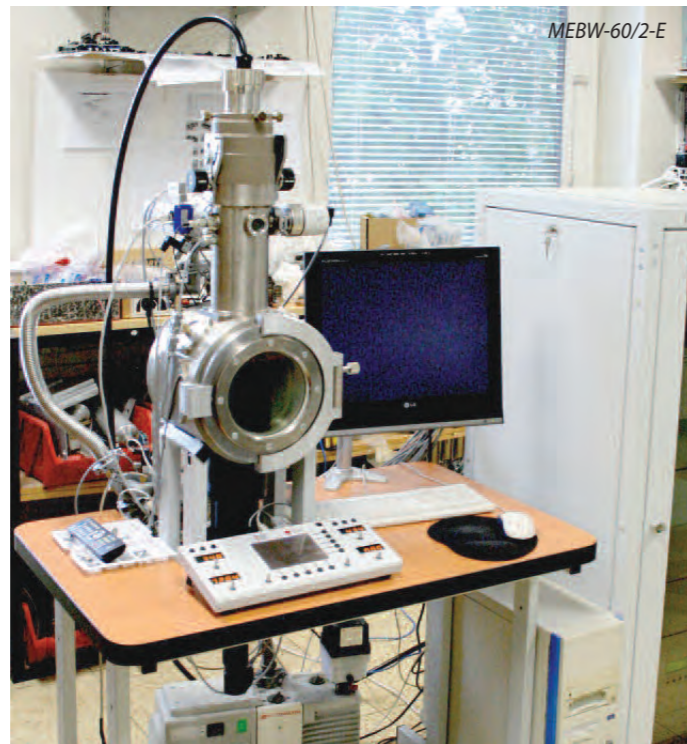
■ Experimentální stolní elektronová svářečka MEBW-60/2-E má komoru se stejnými rozměry jako SES-1, ale je vybavena elektronovou tryskou 60 kV/2 kW. Elektronika svářečky je plně digitalizovaná a přes ovládací pult lze svařovat v několika základních režimech. Ovládací procesus přes osobní počítač umožňuje i pokročilé režimy jako svařování po křivce a gravírování (lokální řízené přetavování povrchu).



ES-2



SES-1



MEBW-60/2-E

Příklady vakuových komponent svařovaných elektronovým svazkem



#### Aplikace elektronové svářečky

- vakuové komponenty (fitinky, ventily),
- komponenty pro jadernou energetiku (např. tepelné výměníky),
- kombinace kovů s rozdílnými fyzikálními vlastnostmi (např. hliník s titanem, niklem nebo stříbrem, měď s nerezí, titan s ocelí apod.),
- svařování těžko tavitelných kovů jako molybden nebo wolfram,
- svařování reaktivních kovů jako zirkon apod.

**Kontakt:** Ing. Martin Zobač, PhD. ■ Ing. Ivan Vlček, PhD. ■ e-mail: zobac@isibrno.cz ■ iv@isibrno.cz ■ tel: 541 514 297

**Podrobnější informace:** <http://ebt.isibrno.cz/Svarovani>

#### Vakuové pájení a žihání

Skupina speciálních technologií disponuje rozsáhlými zkušenostmi s vakuovým pájením, a to např. stříbrem, mědí nebo niklovou pájkou. Ke spojování kovů s křehkými nekovovými materiály zavedla pájení tvárnými aktivními pájkami. Totéž zařízení se využívá i k žihání součástek ve vakuu.

**Pracoviště ÚPT disponuje dvěma vakuovými pecemi s následujícími parametry:**

Modernizovaná vakuová pec PZ 810 z produkce Tesly Rožnov:

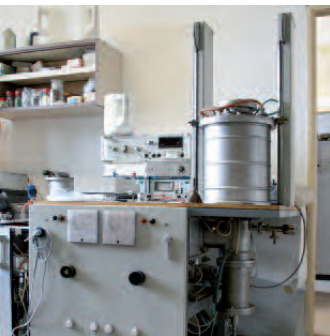
- max. rozměry vsázky: průměr 350 mm, výška 590 mm,
- max. dlouhodobá teplota 1400 °C, molybdenový topný a stínící systém,
- vakuum  $5 \times 10^{-2}$  Pa až 1 Pa podle typu vsázky a pracovní teploty,
- IR ohřev molybdenovým topným košem,
- maximální rychlost nárůstu teploty 1500°C za hodinu,
- chladnutí bez použití inertního chladiva (přirozené ve vysokém vakuu),
- doba ochlazování okolo 8 hodin.



Modernizovaná vakuová pec PZ 810.



Příklady použití vakuového pájení.



Laboratorní pec vlastní konstrukce.

Laboratorní pec vlastní konstrukce, vhodná pro pájení a tepelné zpracování menších součástek:

- rozměry vsázky: průměr 150 mm, výška 200 mm,
- možnost nastavení komory pro pájení trubek o max. průměru 18 mm,
- maximální teplota 1100°C.

**Kontakt:** Ing. Martin Zobač, PhD. ■ Ing. Ivan Vlček, PhD. ■ e-mail: zobac@isibrno.cz  
iv@isibrno.cz ■ tel: 541 514 297

**Podrobnější informace:** <http://ebt.isibrno.cz/VakuovePajeni>

### Vývoj a výroba vakuových průchodek

Skupina speciálních technologií vyvíjí a vyrábí metodou skleněného zátavu (zátav s kovarovým sklem nebo tlakový zátav) vakuové elektrické průchodky, které lze přivařit na příruby. Na pracovišti jsou dostupné následující kategorie a typy průchodek:



Příklady vakuových průchodek.

- jednokolíková vakuová průchodka pro teplotní rozsah -196°C až +400°C,
- sedmi- a dvanácti-kolíkové průchodky pro teplotní rozsah -196°C až +400°C,
- proudové průchodky pro teplotní rozsah -60°C až +300°C,
- vysokotlaké průchodky pro jaderný průmysl pro teplotní rozsah -60°C až +300°C,
- zákaznické průchodky.

### Aplikace průchodek

- různá vakuová zařízení včetně ultravysokovakuových (UHV) jako elektronové mikroskopy apod.,
- jaderná energetika.

**Kontakt:** Ing. Martin Zobač, PhD. ■ Ing. Ivan Vlček, PhD. ■ e-mail: zobac@isibrno.cz  
iv@isibrno.cz ■ tel: 541 514 297

**Podrobnější informace:** <http://ebt.isibrno.cz/VakuovePruchodky>

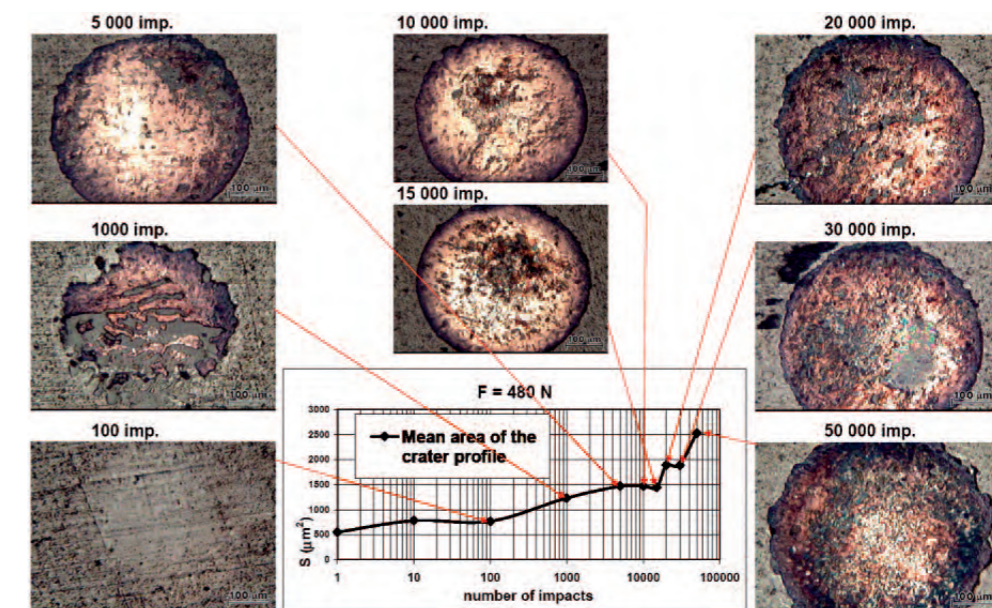
### Depozice tenkých vrstev magnetronovým naprašováním a jejich dynamické rázové testování

Tenké vrstvy připravujeme pomocí vysokofrekvenčního magnetronového naprašování na komerčním zařízení LEYBOLD-HERAEUS Z 550. Toto zařízení umožňuje produkovat malé série nebo jednotlivé kusy substrátů s maximálním průměrem 100 mm a tloušťkou 20 mm. Naprašovačka je vybavena třemi magnetrony s průměrem terče 152 mm pro naprašování až tří různých materiálů během jednoho vakuového cyklu. Pro speciální účely je možné přivést na substrát elektrické napětí (tzv. naprašování s předpětím, iontové leptání) a podložku lze před depozicí ohřívat.

### Aplikace magnetronového naprašování

- Deponujeme **multivrstvy pro rentgenovou optiku** v kombinacích dvojevrstev nikl/uhlíkové, molybden/křemíkové, skandium/křemíkové a.j., vhodné pro rentgenové záření v rozmezí vlnových délek **od 12 nm do 50 nm**. Maximální hodnoty odrazivosti pro kolmý dopad dosahují až 70 %.
- Pro velmi krátké vlnové délky rentgenového záření (pod 4 nm) nemohou být multivrstvé systémy použity kvůli nerovnostem rozhraní, která způsobují značnou degradaci odrazivosti. Přesto jsou periodické multivrstvy použitelné pro šikmý dopad, při němž poskytují odrazivost mnohem vyšší než monovrstvé povlaky.

V současné době jsme jedním ze dvou pracovišť v ČR, která nabízejí **charakterizaci tvrdých otěruvzdorných nanokompozitních a multivrstevných povlaků dynamickým rázovým testerem**. Během testování je povrch vzorku cyklicky zatěžován úderem wolfram-karbidovou kuličkou, simulujícím dynamické namáhání systému vrstva/podložka například u razníků, obráběcích nástrojů, povlakovaných částí automobilových motorů a další.



**Kontakt:** Ing. Jaroslav Sobota, CSc. ■ e-mail: sobota@isibrno.cz ■ tel: 541 514 256  
**Podrobnější informace:** <http://ebt.isibrno.cz/Naprasovani>

*Environmentální rastrovací elektronová mikroskopie (EREM) představuje jeden z moderních vývojových trendů v mikroskopických metodách. Umožňuje zkoumání vzorků živé i neživé přírody v podmínkách vysokého tlaku plynů až 3000 Pa, ve kterých se nejen povrch nevodivého preparátu nenabíjí, ale dokonce lze uchránit vlhký vzorek před vyschnutím. Přístroje EREM přitom umožňují pracovat i v tlaku pod 0,001Pa, odpovídajícím podmínkám pozorování v klasickém rastrovacím elektronovém mikroskopu.*

*Přední strana solárního článku bez metalizace, zobrazeno bez pokovení (str. 20).*

## **Environmentální rastrovací elektronová mikroskopie a detekční systémy.**

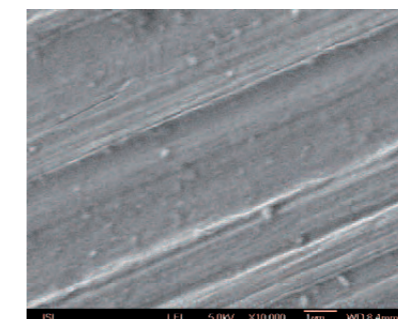
Je-li tlak plynů v komoře vzorku EREM vyšší než přibližně 200 Pa, dochází k ionizačním srážkám primárních i signálních elektronů s atomy a molekulami plynů v okolí preparátu a vzniklé ionty kompenzují nabíjení vzorku dopadajícími elektrony. Tento proces umožňuje pozorování elektricky nevodivých vzorků bez nutnosti pokrytí jejich povrchu elektricky vodivou vrstvou. Je-li v komoře vzorku tlak plynů, nejlépe vodních par, vyšší než 611 Pa (při teplotě 0°C), lze pozorovat objekty obsahující menší či větší množství vody bez vyschnutí a zborcení.

### **Možnosti EREM:**

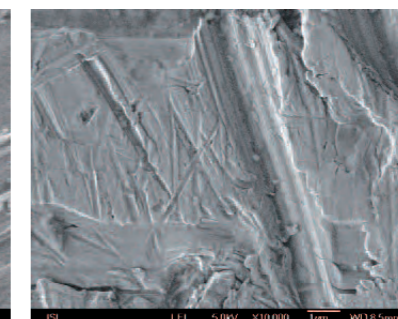
- Studium detailů struktury povrchů vodivých i nevodivých vzorků pocházejících z živé i neživé přírody o rozměrech nanometrů až milimetrů.
- Studium vlhkých vzorků a vzorků na fázovém rozhraní skupenství (procesy kondenzace, vypařování, tání, tuhnutí, atd.).
- Studium vzorků v podmínkách mechanického i tepelného namáhání v prostředí vakua, nebo různých druhů plynů s volitelnou vlhkostí.
- Studium materiálového, topografického, popř. napětového kontrastu (umožňujícího zobrazit nahromadění a rozložení elektrického náboje, například na hradlech tranzistorů).
- Studium reakcí různých chemických látek v komoře vzorku mikroskopu.
- Studium chemicky agresivních látek, například bateriových hmot.
- Studium různých druhů vzorků v podmínkách blízkých se atmosférickému tlaku.

### **Vybrané aplikace EREM a výsledky výzkumu ve spolupráci s průmyslovými partnery za poslední tři roky:**

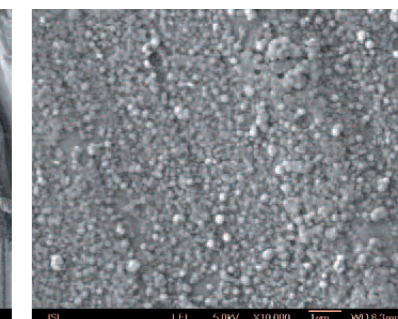
- Vývoj a výroba speciálních detekčních systémů pro elektronové mikroskopy.
- Studium desítek vybraných materiálů před korozi a po korozi různými chemickými látkami s cílem zjistit odolnost a životnost zkoumaných materiálů a odhadnout změnu jejich mechanických vlastností vlivem koroze.



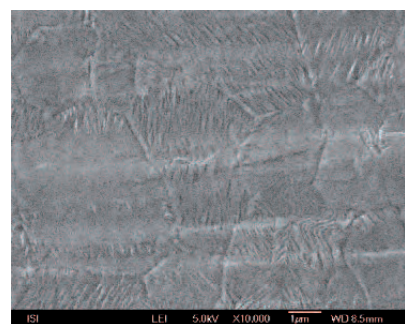
Nekorodovaný povrch tantalu.



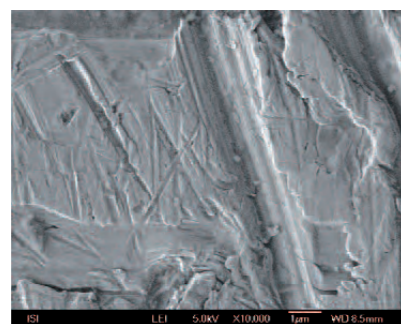
Povrch tantalu korodovaný v H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.



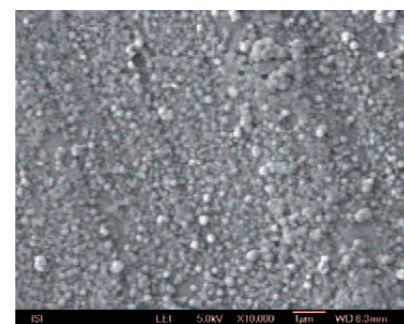
Povrch tantalu korodovaný v KOH.



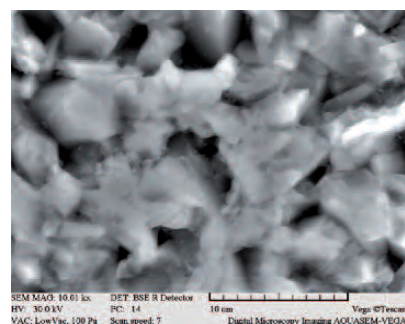
Nekorodovaný povrch nerezí.



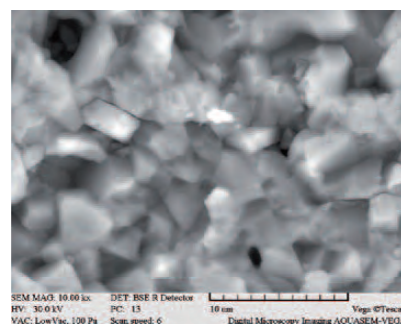
Povrch nerezí korodovaný v H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.



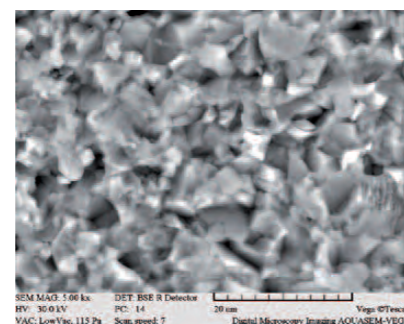
Povrch nerezí korodovaný v KOH.



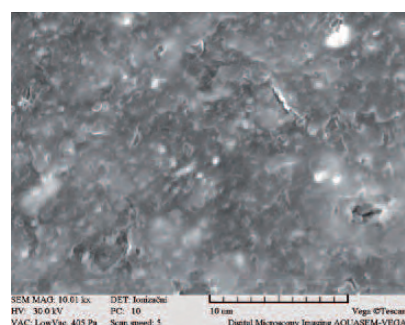
Nekorodovaný povrch keramiky Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.



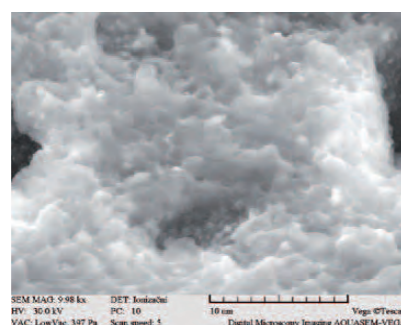
Povrch keramiky korodovaný v H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.



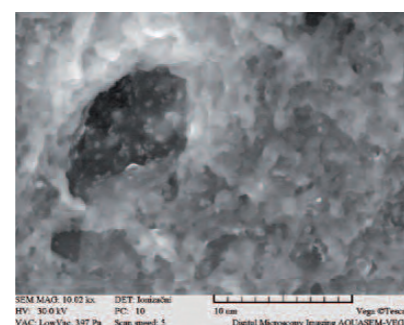
Povrch keramiky korodovaný v H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>.



Nekorodovaný povrch těsnícího „O“ kroužku.

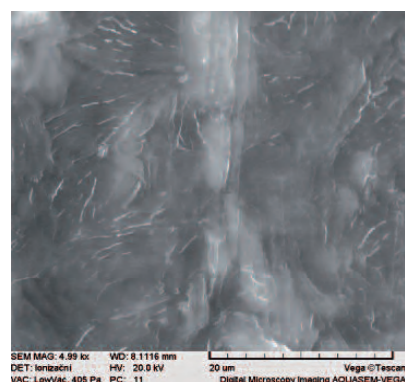


Povrch těsnícího kroužku korodovaný v H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

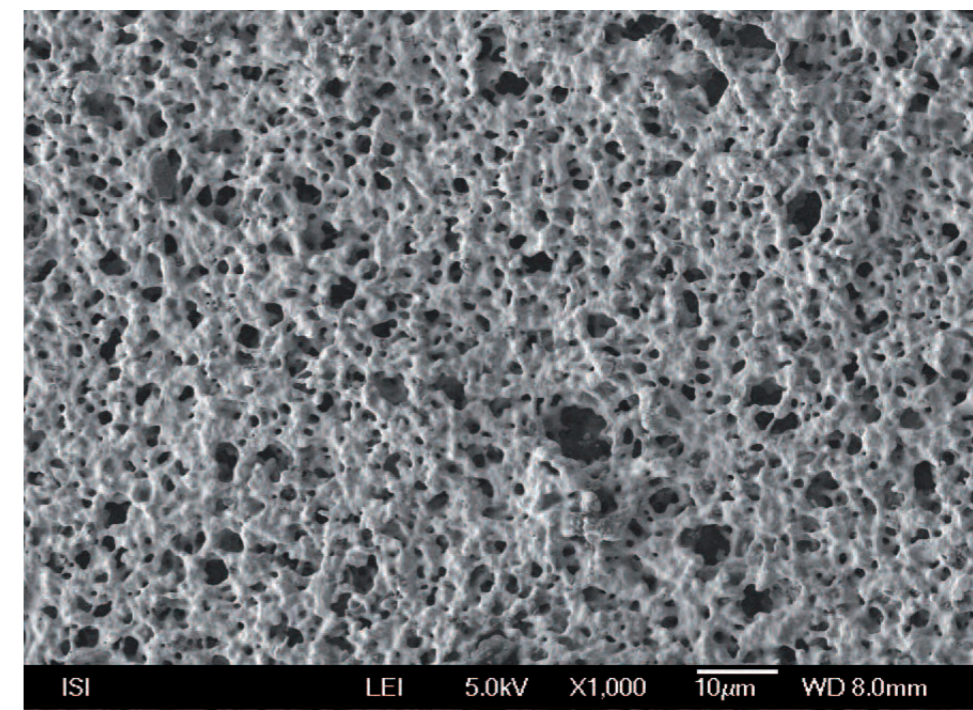
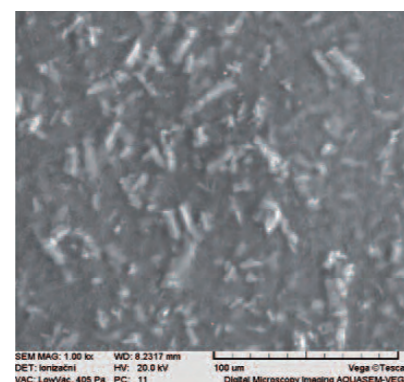
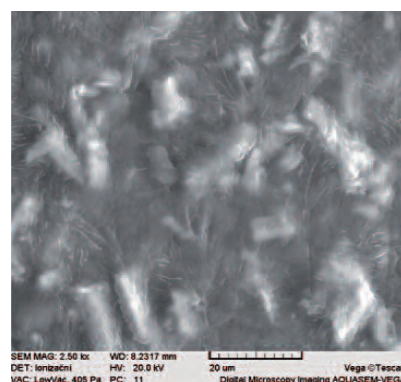


Povrch těsnícího kroužku korodovaný v HNO<sub>3</sub>.

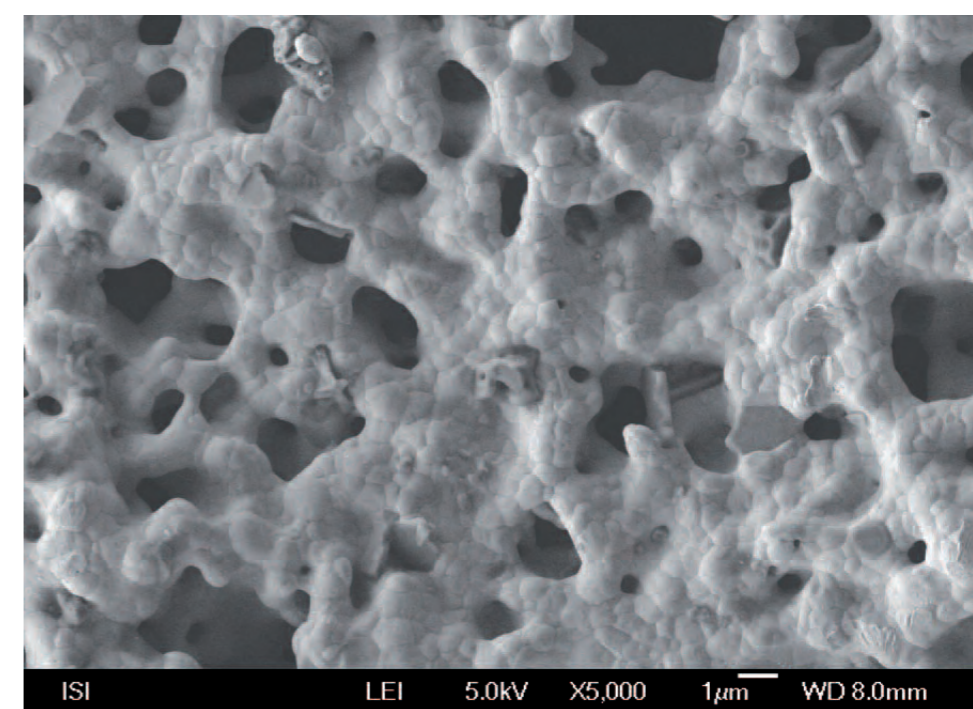
■ Studium vnitřního povrchu několika typů cévních katétrů s cílem mapovat a vzájemně porovnat jejich topografickou strukturu. V případě výrazné topografie povrchu by mohlo hrozit nebezpečí vzniku embolie.



Vnitřní povrch cévního katétru zobrazený pomocí environmentálního rastrovacího elektronového mikroskopu.

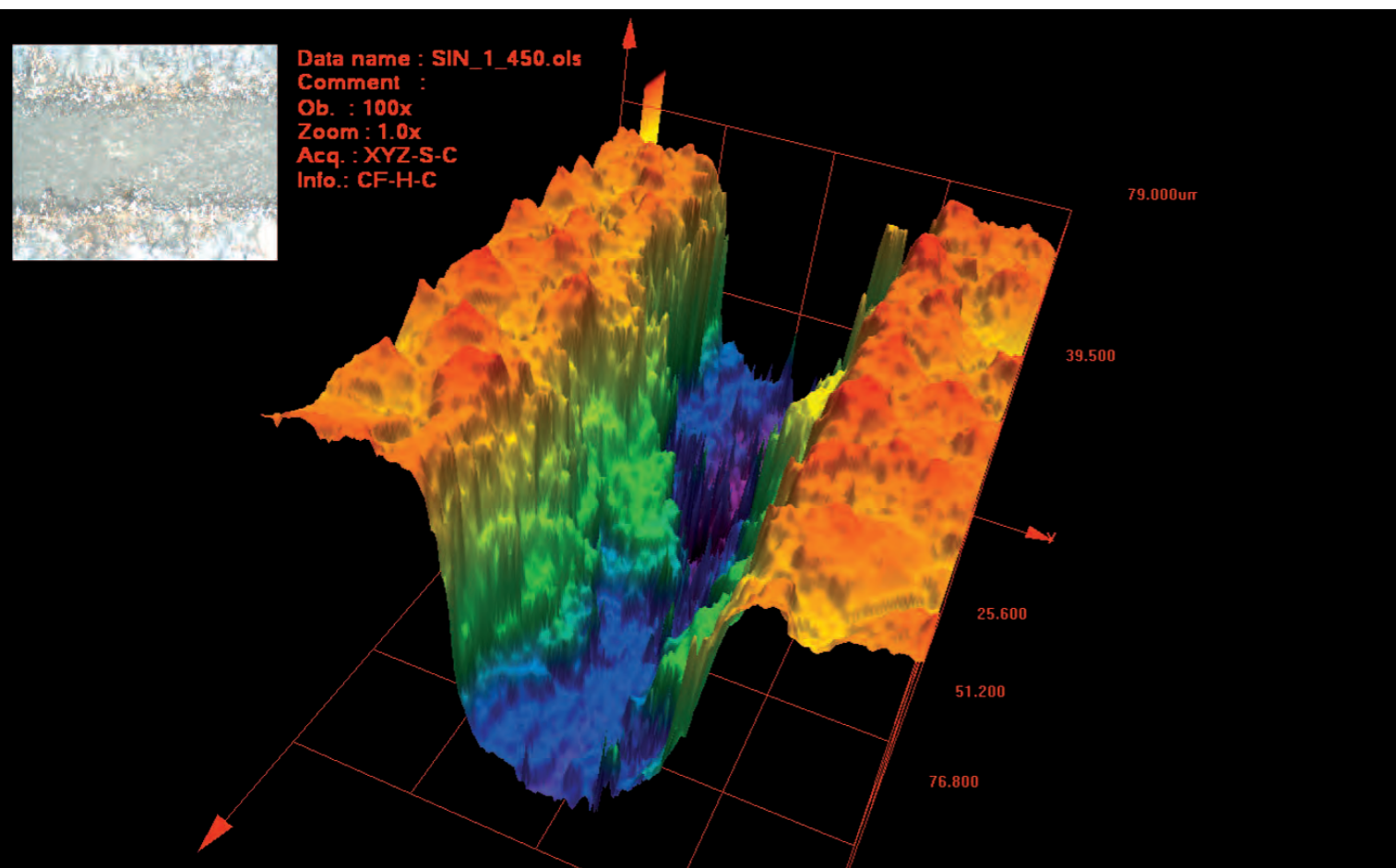
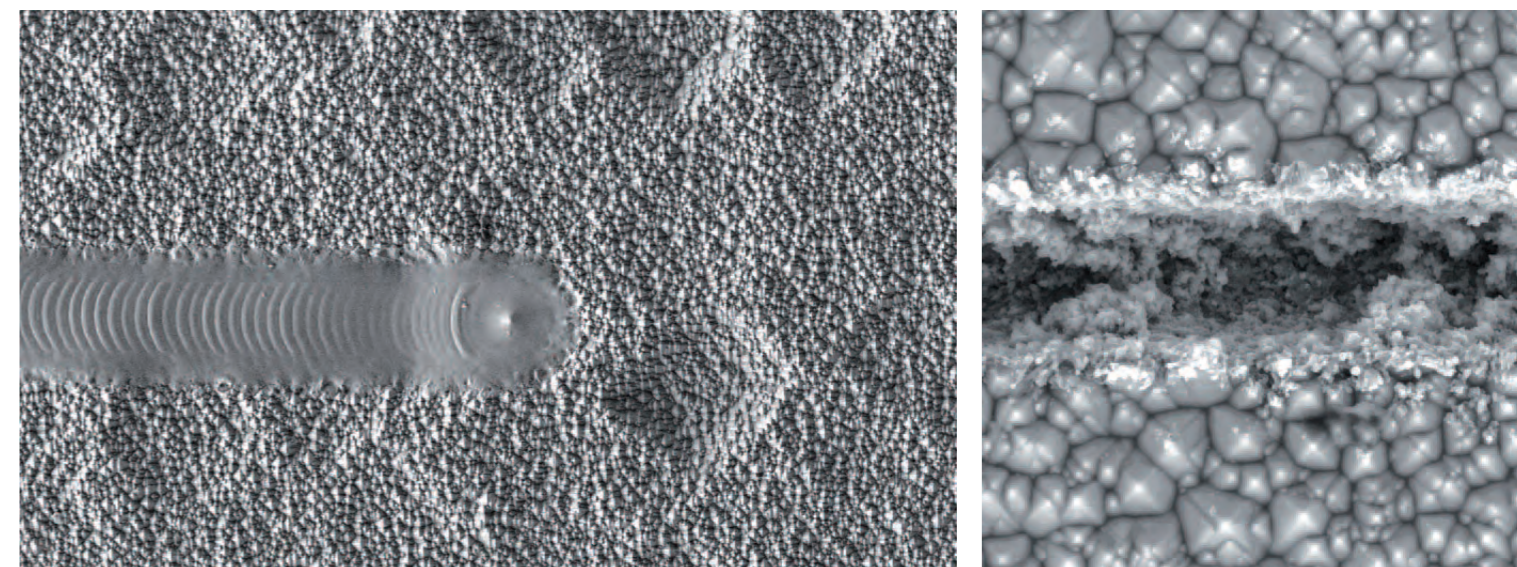
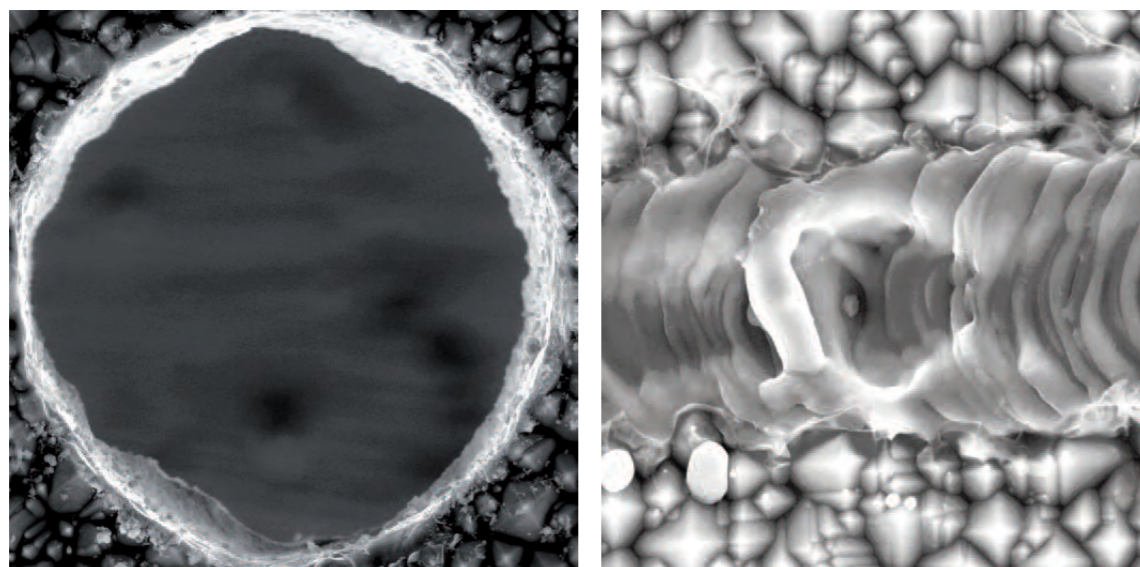


Povrchová struktura pracovní elektrody elektrochemického senzoru ve dvou různých zvětšeních.



■ Studium povrchů pracovních elektrod elektrochemických senzorů s cílem podrobně zmapovat povrchovou topografickou strukturu, změřit její skutečnou a geometrickou plochu a výsledně optimalizovat výrobní proces tohoto produktu a uvést na trh zcela nový typ elektrochemických senzorů.

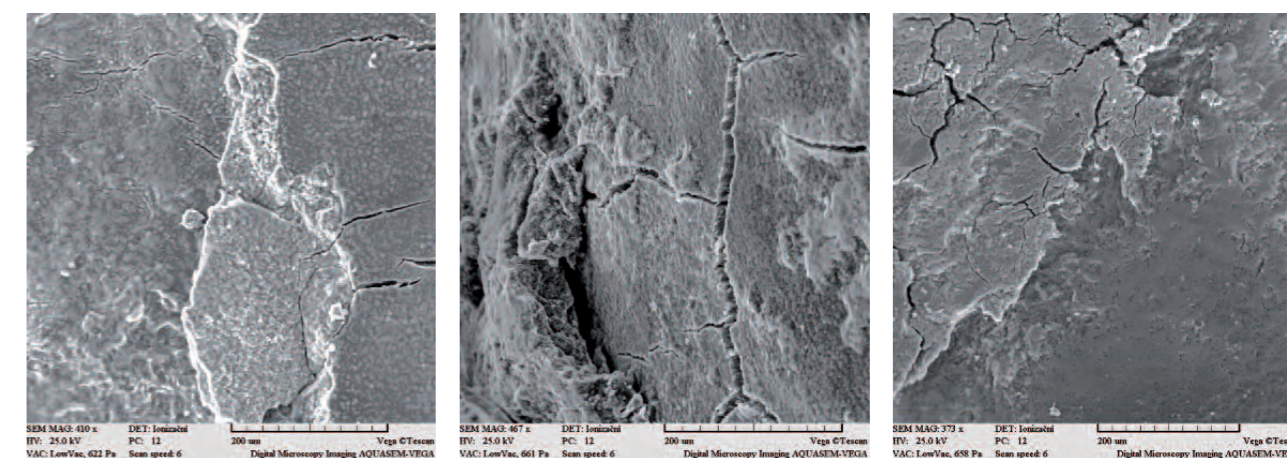
Povrchová struktura solárních článků opracovaná různými laserovými systémy.



- Studium povrchové struktury solárních článků s cílem podrobně zmapovat vliv laserových procesů na různé vlastnosti těchto článků a optimalizovat jejich použití během výroby fotovoltaických zdrojů.
- Ve spolupráci s lékařským zařízením byla provedena rozsáhlá studie vlivu různých technik odstraňování zubního kamene na poškození lidských zubů. Byla vyhodnocena vhodnost, účinnost a efektivita jednotlivých technik v poměru k nákladům na jejich pořízení do stomatologických ordinací.

Povrchová topografie lidských zubů v oblasti rozhraní mezi zubním kamenem a očištěnou sklovinou bez zubního kamene. Zubní kámen byl odstraněn za použití různých technik (dole).

Kontakt: Ing. et Ing. Vilém Neděla, Ph.D. ■ e-mail: vilem@isibrno.cz ■ tel: 541 514 333  
 Podrobnější informace: www.isibrno.cz/



## Kryogenika a supravodivost



Zásobníky kapalného hélia (str. 26).

Základní pracovní náplň skupiny *kryogeniky a supravodivosti* byl výzkum a vývoj supravodivých magnetů pro nukleární magnetickou rezonanci (NMR) včetně souvisejícího vědeckého i technického zázemí k dosahování a uchovávání velmi nízkých teplot (až do 1,5 K, resp. -271,7°C). V průběhu let se náplň činnosti postupně rozšiřovala o další nezbytné součásti kryogeniky, např. o vakuovou techniku, nízkoteplotní termometrii, materiálové inženýrství a další. V současné době řeší skupina projekty z oblasti základního i aplikovaného výzkumu. V obou případech skupina využívá své rozsáhlé, a v rámci ČR zcela ojedinělé experimentální zázemí k ověřování a testování vědeckých i technických teorií a poznatků. Významným podpůrným prvkem je vlastní zkapaňovač hélia.

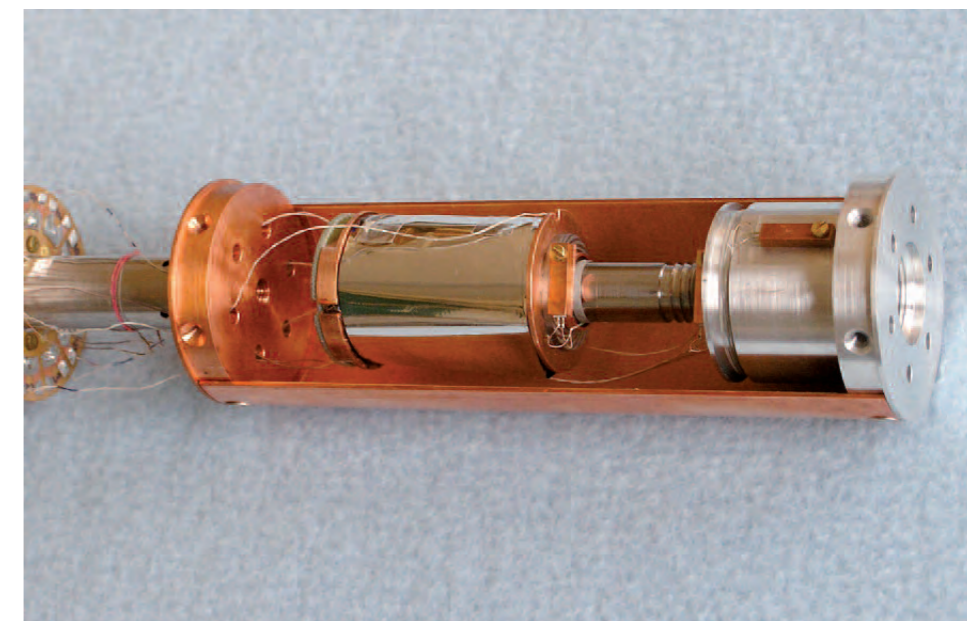
Skupina *kryogeniky a supravodivosti* nabízí své zkušenosti v následujících oblastech:

- nízkoteplotní termometrie,
- návrhy a realizace kryogenních systémů,
- stanovení tepelně-radičních vlastností materiálů,
- vakuová technika a nízkoteplotní vakuová technika
- měření magnetických polí a návrhy supravodivých magnetů,
- konzultace a školení v oblasti bezpečnosti kryogenní techniky.

**Nízkoteplotní termometrie**

Aktivita v této oblasti využívají zařízení vlastní konstrukce, která umožňují:

- kalibraci teplotních snímačů pomocí sekundárního teplotního etalonu v rozsahu 1,4–100 K s přesností lepší než  $\pm 16$  mK,
- měření tepelné vodivosti materiálů a součástek v rozsahu teplot 10–300 K. Menší vzorky do průměru 40 mm a délky 50 mm lze proměřovat v existujícím zařízení, pro větší vzorky je možné navrhnout a vyrobít speciální měřicí zařízení.



Zařízení k měření tepelného toku hřídelem heliového kompresoru.

Kryostat supravodivého  
magnetu spektrometru NMR.



### Návrhy a realizace kryogenních systémů

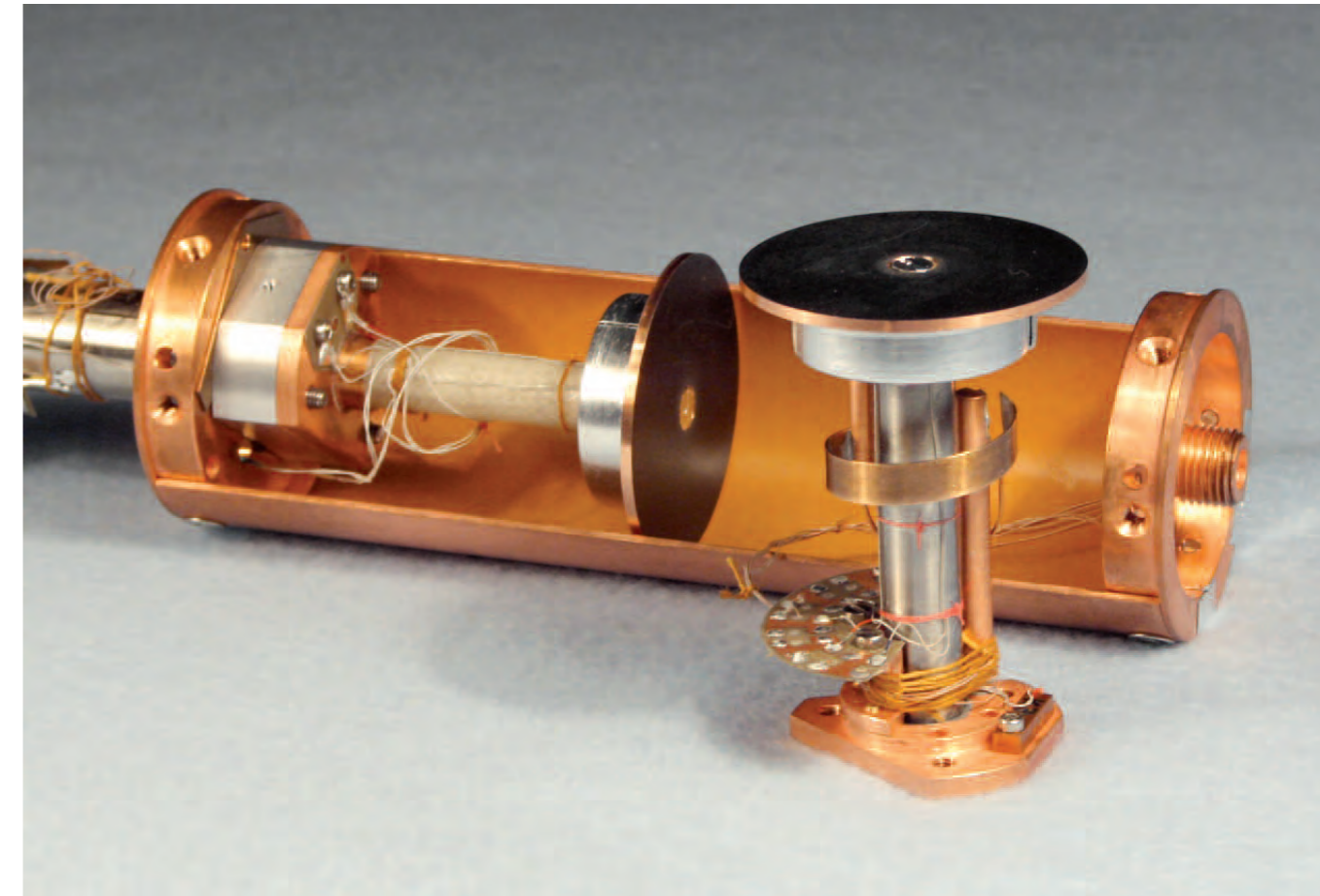
Realizovali jsme množství specializovaných kryogenních systémů pro širokou škálu použití a máme navrženy teoretické i experimentální postupy (programy, testy, ověřování vlastností) vedoucí až k realizaci konkrétního systému dle požadavků zákazníka.

Nabízíme mnohaleté zkušenosti v následujících oblastech:

- **numerické modelování ustálených i neustálených tepelných dějů** v kryogenních systémech pomocí námi vyvinutého programu KRYOM 3.3,
- **licenci k programu KRYOM 3.3**, který umožňuje analyzovat a optimalizovat obvyklá kryotechnická zařízení,
- **tepelné cyklování materiálů** v rozsahu 4,2–373 K,
- **zjišťování mechanických vlastností materiálů za nízkých teplot**,
- **chlazení využívající zkapalněných plynů**.

**Příklady realizací:**

- kryostaty pro uchovávání zkapalněných plynů (např. pro supravodivé magnety),
- kryogenní systémy pro fyzikální experimenty,
- héliová kryovývěva pro vakuová čerpání bez vibrací a elektromagnetických polí.



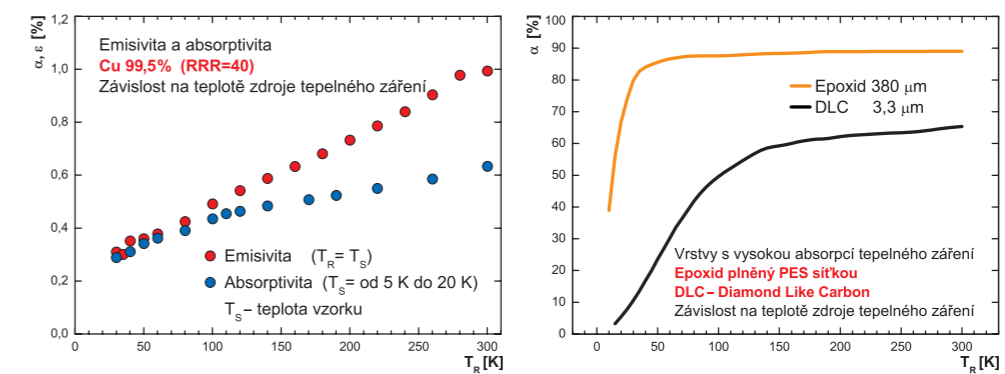
### Stanovení tepelně radičních vlastností materiálů

Radiační a absorpční vlastnosti povrchů hrají v kryogenice zásadní úlohu a významným způsobem ovlivňují ekonomiku provozu a často i funkci systémů pracujících za velmi nízkých teplot. V mnoha případech je nutné eliminovat parazitní tepelný tok z teplého povrchu na studený.

Zajišťujeme

- **měření teplotních závislostí emisivit a absorptivit povrchů materiálů** na vzorcích o průměru 40 mm v rozsahu teplot 20–300 K.

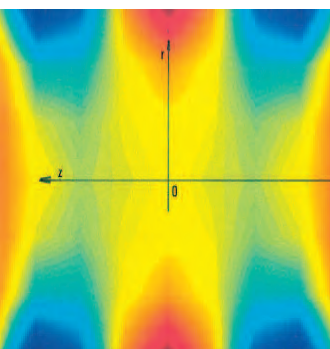
*Příprava měření absorptivity  
černého povrchu.*



*Teplotní závislost emisivity  
a absorptivity mědi a absorptivity  
nekovových povrchů s vysokou  
absorpcí tepelného záření  
(„černé povrchy“).*



Héliová kryovývěva pro superčistě čerpání vakuových prostorů bez vibrací a bez elektrického napájení.



Mapa magnetického pole s rotační symetrií.

### Vakuová technika

Mnohaleté působení v tomto oboru nám přineslo praktické zkušenosti v následujících aktivitách:

- kvantitativní i kvalitativní stanovení zbytkových plynů (až do hmotnostního čísla 100) ve vakuových systémech,
- superčistě čerpání vakuových prostorů héliovou kryovývěvou vlastní konstrukce, která dosahuje čerpací rychlosti 25 l/s pro hélium a může čerpat vakuové prostory až do tlaku  $10^{-7}$  Pa bez vibrací a bez elektrického napájení,
- měření nízkých tlaků v rozsahu 100 Pa–0,6 MPa v neagresivním prostředí s přesností 0,1 %,
- hledání netěsností ve vakuových systémech, v prochlazených systémech i hledání netěsností pro supratekuté hélium ( $\lambda$ -netěsnost).

### Stacionární magnetická pole

Historické propojení skupiny s problematikou magnetické rezonance a supravodivých magnetů prohloubilo naše zkušenosti v následujících aktivitách:

- **mapování rozptylových magnetických polí** s využitím Hallovy sond,
- **precizní měření homogenních magnetických polí** v rozsahu 0,7–13,7 T metodou využívající magnetické rezonance,
- experimentální **stanovení vlivu stacionárního magnetického pole** až do 4,7 T na vyvíjené technické systémy,
- **návrhy a realizace supravodivých magnetických systémů** s rotační symetrií.

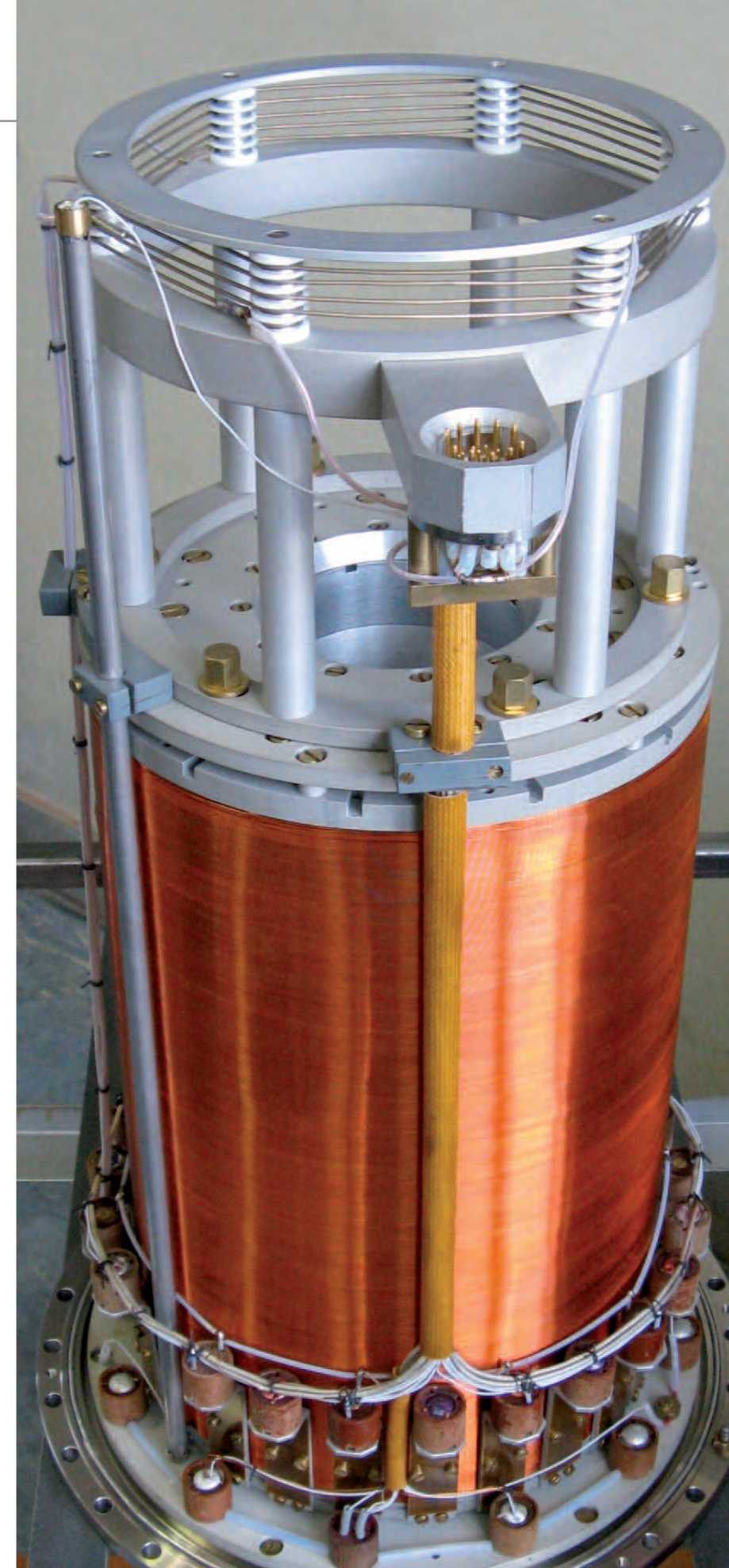
### Konzultace a školení o bezpečnosti v oblasti kryogenní techniky

Nebezpečí v oblasti kryogeniky jsou značná a nejsou na první pohled příliš zřetelná. Osoby pracující v této oblasti musí být dobře informovány a proškoleny, neboť hrozí vážné poškození zdraví (nizkoteplotní popáleniny, mechanická zranění, smrt udušením). Většina nádob na uchování zkapalněných plynů jsou tlakové nádoby, pro které platí velmi přísné předpisy pro výrobu, manipulaci i údržbu.

Nabízíme konzultace a školení v následujících oblastech:

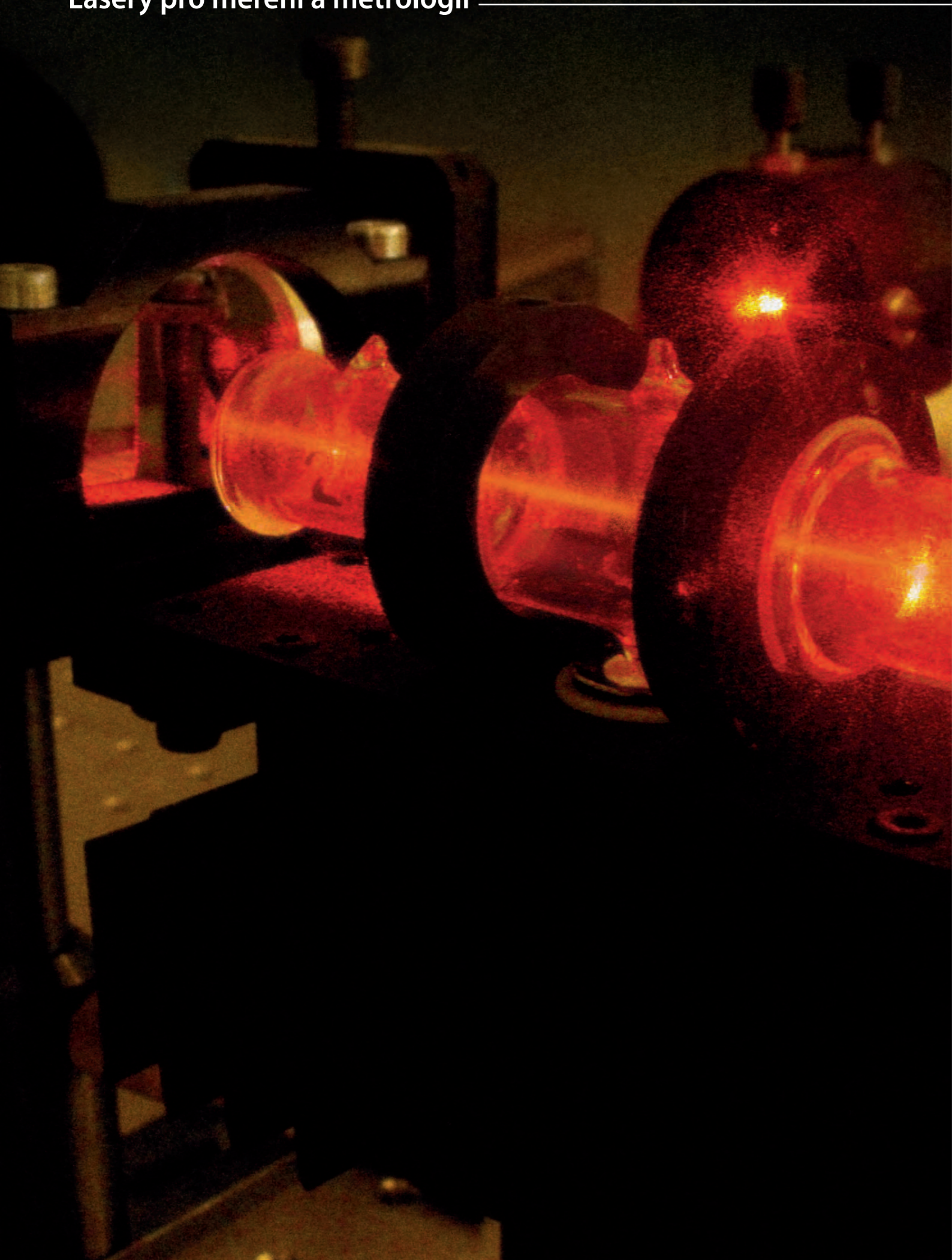
- bezpečnost práce s kryokapalinami,
- bezpečnost při skladování a dopravě kryokapalin.

**Kontakt:** Ing Aleš Srnka, CSc. ■ e-mail: [srnka@isibrno.cz](mailto:srnka@isibrno.cz) ■ tel: 541 514 264  
 Ing. Tomáš Králík, PhD. ■ e-mail: [kralik@isibrno.cz](mailto:kralik@isibrno.cz) ■ tel: 541 514 269  
 Ing. Pavel Hanzelka ■ e-mail: [hanzelka@isibrno.cz](mailto:hanzelka@isibrno.cz) ■ tel: 541 514 265  
**Podrobnější informace:** <http://www.isibrno.cz/cryogenics>



Supravodivý magnet 4,7 T pro NMR spektrometr.





V roce 2010 slaví laser 50. výročí od svého vzniku. Od počáteční kuriozity vědeckých laboratoří si dnes již našel cestu do téměř každé domácnosti. Přes tisíce různých aplikací laseru patří laserové měření vzdáleností mezi jednu z neznámějších. V laboratořích ÚPT byl realizován první český He-Ne laser jen tři roky po jeho světové premiéře a jeho konstrukce byla postupně zdokonalována pro potřeby české metrologie.

Z této mnohaleté historie vychází i naše nabízené zkušenosti v následujících oblastech:

- **úprava spektra vlnových délek** vyzařovaného plynovými a polovodičovými lasery,
- **konstrukce laserů** pro metrologické aplikace s **extrémní stabilitou** vyzařované frekvence,
- **zhotovování kyvet plněných ultračistými plyny** pro absorpční spektroskopii,
- **návrh a realizace interferometrických měřicích systémů.**

### Lasery s vysokou koherencí pro měřicí účely

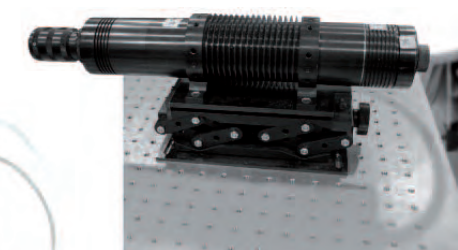
Lasery vyvinuté v ÚPT jsou unikátní svou vysokou koherencí, a proto jsou vhodné k:

- **přesnému měření vzdáleností** na principu laserové interferometrie,
- **analýze složení plynů** a dalších transparentních látek na principu laserové spektroskopie.

ÚPT disponuje lasery s vysokou koherencí, pracující na následujících vlnových délkách: **502 nm, 532 nm, 543 nm, 633 nm, 760 nm, 780 nm, 1064 nm, 1315 nm, 1540 nm.** Podle potřeby uživatelů lze tento základní výběr rozšířit o další vlnové délky.

### Příklady realizovaných konstrukcí

- **He-Ne lasery a výbojové trubice pro konstrukci He-Ne laserů.** Vyvinuli jsme technologii výroby plynových He-Ne laserů, které dominují v oblasti přesného měření délky. Tyto lasery jsou teplotně stabilní a vhodné např. jako zdroj laserového záření pro odměřovací systémy na principu laserového interferometru. Od většiny světových výrobců se naše He-Ne lasery liší především rychlým přeladěním vlnové délky vyzařovaného světla, které zajišťují integrované piezoelektrické měniče.



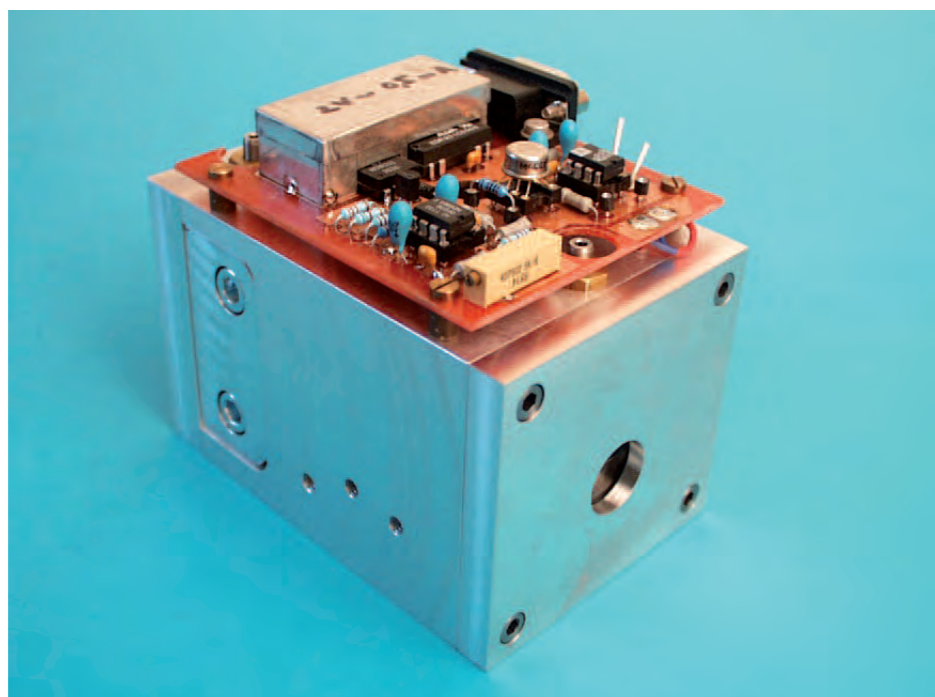
Finální He-Ne laser (nahore) a jeho klíčová část – výbojová trubice z křemenného skla (vlevo).

- **ECL lasery pro měření a spektroskopii.** Tradiční He-Ne lasery pracující ve viditelné oblasti spektra je možné ladit pouze ve velmi úzkém spektrálním rozsahu. Tuto nevýhodu nemají laserové diody, které však na rozdíl od He-Ne laserů mají mnohem širší spektrum současně

*Experiment s absorpční kyvetou (str. 32).*

vyzařovaných vlnových délek, a proto nejsou vhodné pro přesnější spektroskopické aplikace např. pro analýzy plynů a dalších materiálů. Vyvinuli jsme proto technologii výroby polovodičových laserů s tzv. externím rezonátorem (Extended Cavity Laser – ECL), který velmi účinně zužuje spektrální vyzařovací charakteristiku běžné laserové diody a současně zachovává široký rozsah dostupných vlnových délek, na které lze laser typu ECL naladit. Získali jsme tak kompaktní laditelný laserový zdroj vhodný pro spektroskopické aplikace, jehož pracovní oblast vlnových délek je určena zvolenou laserovou diodou.

*ECL laser pracující na vlnové délce 633 nm s přeladěním vlnové délky o 0,1 nm. Tento laser je používán jako náhrada He-Ne laseru.*



- **Laserné systémy s laserovými diodami VCSEL, DFB a DBR.** Vyvinuli jsme specializovanou elektroniku pro řízení vlnové délky komerčních laserových diod, které se vyznačují úzkým spektrálním profilem vyzařovaného světla. Jedná se o diody s vertikálním rezonátorem VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser), distribuovanou zpětnou vazbou DFB (Distributed FeedBack) a distribuovaným Braggovým reflektorem DBR (Distributed Bragg Reflector). Vyzařované vlnové délky těchto diod se řídí velikostí injekčního proudu protékajícího přes polovodič a pracovní teplotou polovodiče. Řídící elektronika je vybavena sadou signálových procesorů, které hlídají uživatelem nastavený pracovní bod laserové diody.

*Příklad řídicí elektroniky pro řízení vlnové délky vysoce koherentních laserových diod (dole).*



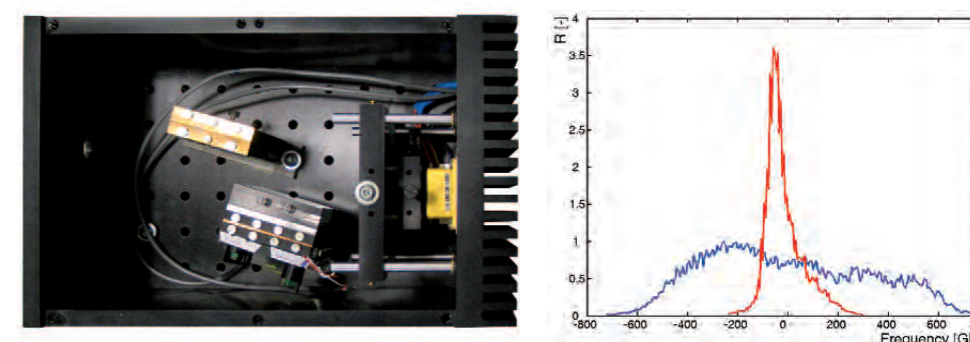
**Kontakt:** doc. Ing. Josef Lazar, Dr. ■ e-mail: [joe@isibrno.cz](mailto:joe@isibrno.cz)  
tel: 541 514 253  
**Podrobnější informace:** <http://www.isibrno.cz/kgs/>

### Výkonové ECL lasery

Výkonové ECL lasery jsou opět založeny na principu zúžení spektrální charakteristiky komerční laserové diody či pole laserových diod vnějším rezonátorem, který obsahuje selektivní zrcadlo a optickou mřížku. Pro další zúžení spektrální čáry jsme použili techniku „injection locking“ s využitím externího Ti:safírového laseru.

#### Realizovali jsme

- výkonový polovodičový laser typu ECL pro **laserovou magnetizaci jader Xenonu** s výstupním výkonem 1,5 W. Takto upravený plyn funguje jako velmi účinná kontrastní látka pro magnetickou rezonanční tomografii. Podobné výkonové lasery mohou nalézt uplatnění např. jako atmosférická optická komunikační pojítka na velké vzdálenosti.



*Na obrázku vlevo je vlastní konstrukce výkonového laseru typu ECL, který využívá pole laserových diod, vpravo je modrou čarou znázorněno výsledné zúžené emisní spektrum tohoto laseru.*

**Kontakt:** doc. Ing. Josef Lazar, Dr. ■ e-mail: [joe@isibrno.cz](mailto:joe@isibrno.cz) ■ tel: 541 514 253  
**Podrobnější informace:** <http://www.isibrno.cz/kgs/>

### Laserné etalony optických frekvencí

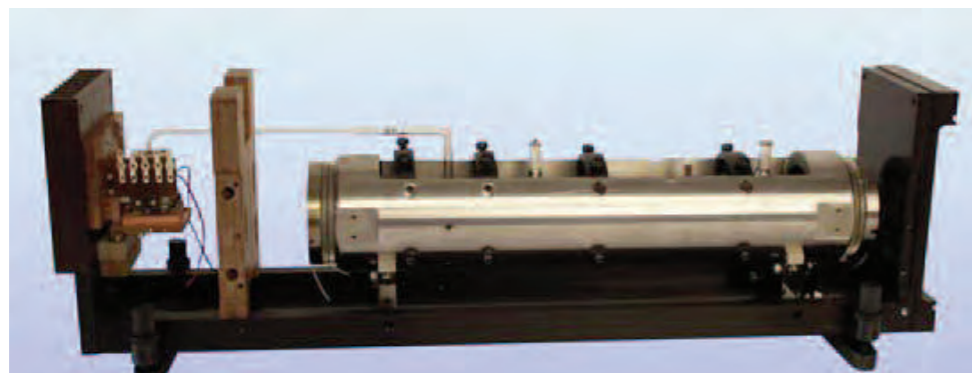
Etalony optických frekvencí (vlnových délek) jsou vysoce koherentní lasery, které generují na svém výstupu laserové světlo o přesně stanovené optické frekvenci (vlnové délce). Jedná se o frekvence v řádu stovek THz, čemuž obvykle odpovídá vlnová délka 500–1500 nm. Tyto lasery slouží jako primární zdroje pro realizaci mezinárodní definice jednotky délky a jsou využívány metrologickými institucemi jako zdroj světla v odměřovacích laserových interferometrech. Pravidelné srovnání podnikových mechanických normálů délky, koncových měrek, s těmito systémy zajistí **navázání metrologického systému podniku na primární definici jednotky délky**. Přesnost a stabilita těchto laserových etalonů pak ovlivňuje celkovou měřicí schopnost sekundárních měřidel v podnikové metrologii. V ÚPT je této oblasti věnována dlouhodobě mimořádná pozornost a byla zde vyvinuta technologie výroby několika typů těchto laserových etalonů optických frekvencí.

#### Příklady realizovaných systémů:

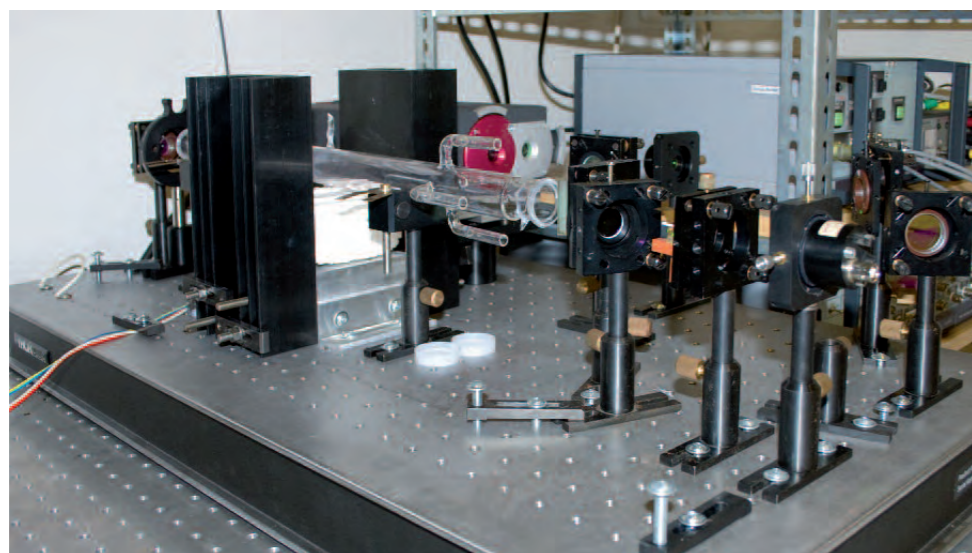
- **He-Ne stabilizovaný laser na vlnové délce 633 nm.** He-Ne laser se stabilizací optické frekvence, sestavený v ÚPT, patří mezi základní etalony na vlnové délce 633 nm a je v současnosti používán jako národní etalon délky. Optická frekvence He-Ne laseru je stabilizovaná

prostřednictvím saturevané absorpce v parách jodu technikou derivační spektroskopie. Jedná se o finální výrobek ÚPT – kompaktní systém vybavený elektronikou podporující počítačové řízení. Relativní stabilita tohoto laseru je pro integrační čas 1 s na úrovni  $10^{-11}$ . Je využíván ke kalibraci laserů určených pro interferometrické systémy.

Poslední verze jodem stabilizovaného He-Ne laseru ÚPT, vybaveného kompletní elektronikou a řídicím software pro nasazení v metrologických střediscích.

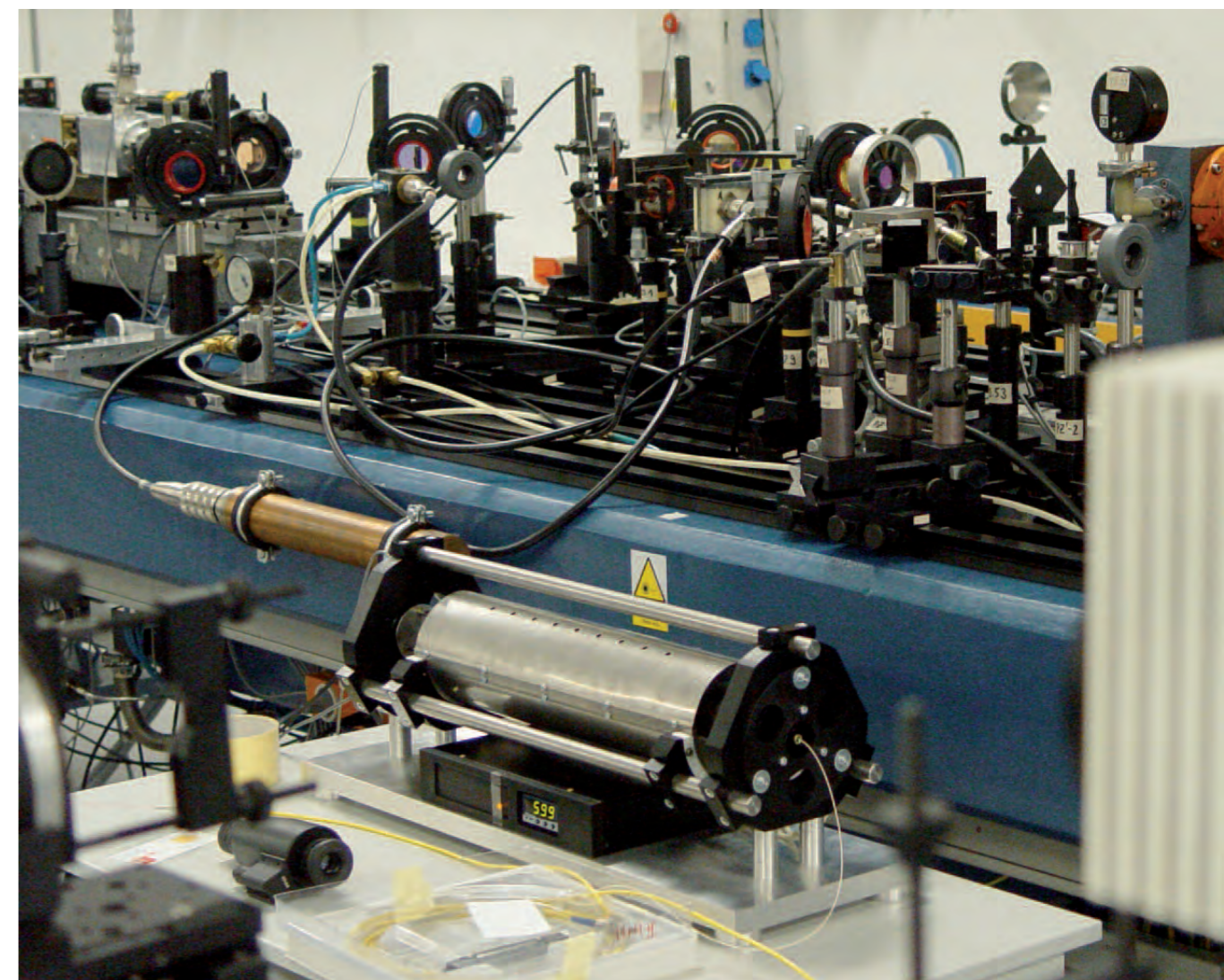


- **Nd:YAG stabilizovaný laser na vlnové délce 532 nm a 1064 nm, využívající absorpci v parách jodu.** Páry molekulárního jódu jsou nejrozšířenějším absorpčním prostředím pro stabilizaci laserů ve viditelné části spektra. Nabízejí hustou síť úzkých hyperjemných přechodů s nejlepším poměrem signál/šum v okolí vlnové délky 500 nm. Jodem stabilizované Nd:YAG lasery (Nd:YAG-I<sub>2</sub>) dosahují stability optické frekvence na úrovni  $10^{-14}$ . ÚPT disponuje experimentálním systémem na bázi Nd:YAG laseru, který generuje stabilní optické frekvence na vlnových délkách 532 nm a 1064 nm.



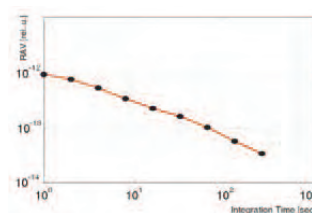
- **Stabilizovaný systém na vlnové délce 1315 nm.** Pro potřeby centra „Prague Asterix Laser System“ (PALS) jsme navrhli a realizovali stabilizovaný laser na bázi úzkospektrální DBR laserové diody, který funguje jako „Master oscillator“ na počátku zesilujícího řetězce. Jedná

se o laser s optovláknovým výstupem, jehož frekvence je stabilizována pomocí lineární absorpce v parách disociovaného jódu. Detekce a řízení je plně autonomní a přístroj je ovládán několika signálovými procesory. Laser pracuje na vlnové délce 1315 nm, tedy v telekomunikačním pásmu, a může sloužit i jako etalon na této vlnové délce.

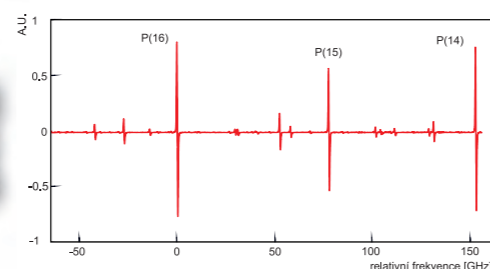
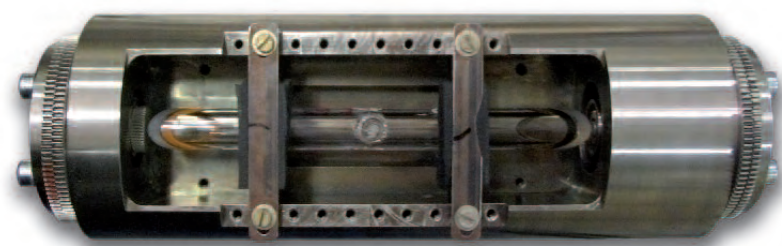


- **Normálový DFB laser na vlnové délce 1540 nm pro optické telekomunikace.** Na objednávku Českého telekomu (v současnosti Telefonica) byl vyvinut stabilizovaný laser sloužící jako etalon optické frekvence v blízkém infračerveném (telekomunikačním) pásmu 1540 nm. Jádrem je DFB laserová dioda s vysokou koherencí. Systém pracuje se stabilizací frekvence prostřednictvím spektroskopie v acetylenu  $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$  a umožňuje přeladění na některou ze spektrálních čar v rozsahu spektra až 200 GHz. Systém lze použít např. pro kalibraci vlnoměrů a spektrálních analyzátorů, které slouží ke správnému nastavení přenosových kanálů pro optické komunikace s multiplexem vlnových délek, tzv. D-WDM (Dense Wavelength Division Multiplexing).

Pohled na konečnou verzi „Master oscillator“ pro laserové centrum PALS.

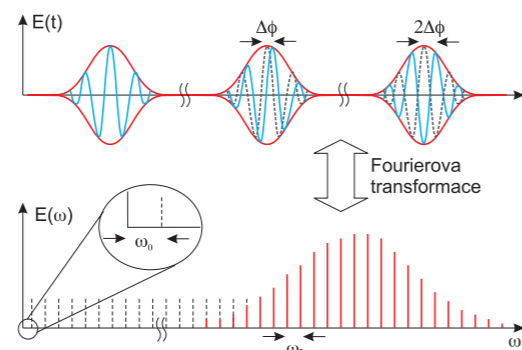
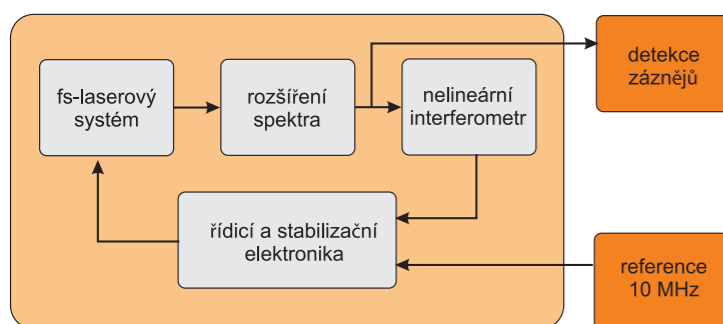


Vpravo je komplexní sestava etalonu optické frekvence na bázi Nd:YAG-I<sub>2</sub> laseru. Nahoře je záznam Allanových variancí ze srovnávacího měření dvou Nd:YAG-I<sub>2</sub> laserů, který prokazuje vysokou stabilitu optické frekvence těchto laserů.



Spektroskopická část telekomunikačního normálu na vlnové délce 1540 nm (vlevo) a průběh záznamu spektra acetylenu, který se používá pro stabilizaci vlnové délky telekomunikačního normálu (vpravo).

■ **Femtosekundový synteázator optických frekvencí.** V laboratořích ÚPT provozujeme dva systémy syntézy optických kmitočtů na bázi femtosekundových pulzních laserů pracujících ve viditelné a v infračervené spektrální oblasti. Optický synteázator umožňuje přenos relativní stability kmitočtů mezi radiofrekvenční a optickou částí spektra a slouží jako reference (etalony) optických frekvencí pro metrologii, interferometrii a spektroskopii. Systémy ÚPT budou v brzké době navazovat na referenci H<sub>2</sub> maseru se stabilitou na úrovni 10<sup>-15</sup>.



Vlevo je blokové schéma optického synteázatoru. Na obrázku vpravo nahoře je časový průběh záření na výstupu synteázatoru a vpravo dole jeho spektrální vyjádření (tzv. optický hřeben).

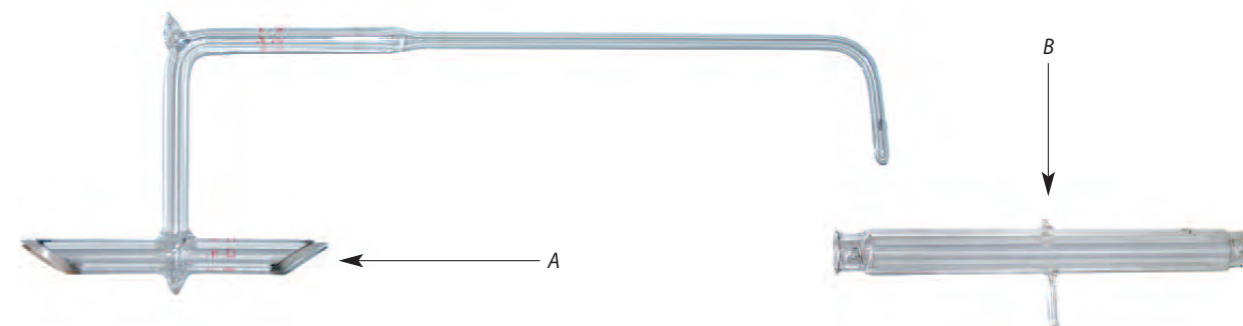
**Kontakt:** Ing. Ondřej Číp, Ph.D. ■ e-mail: ocip@isibrno.cz ■ tel: 541 514 254  
**Podrobnější informace:** <http://www.isibrno.cz/kgs/>

### Absorpční kyvety pro spektroskopii a optické frekvenční etalony

Absorpční kyvety slouží především pro laserovou spektroskopii plynů a využívají se jako reference ke stabilizaci optických frekvencí laserů na vybrané absorpční čáry. Technologie výroby kyvet v ÚPT je realizována ve specializované sklářské dílně a jedná se především o kusovou zakázkovou produkci pro významné národní metrologické instituty, např. PTB v Německu, NIST v USA, BIPM ve Francii atd.

#### Příklady a vlastnosti zhotovených kyvet:

■ z křemenného skla s klínovitými okny vybavenými antireflexí nebo s okny pod Brewsterovým úhlem,



■ plněné superčistými plyny (acetylen <sup>13</sup>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, metan, xenon, krypton) nebo nasycenými parami jodu, cesia, rubidia. Kyvety plněné jodem slouží jako reference základních normálů (vlnové) délky. Frekvenční odchylky kyvet plněných v ÚPT jsou nejmenší na světě (pod 1 kHz optického kmitočtu). Technologie ÚPT dovoluje plnit vyráběné kyvety i dalšími plyny podle konečného určení.

Specializovaná kyveta s Brewsterovými okny pro etalon optické frekvence na bázi He-Ne laseru (obr. A). Standardní kyveta s klínovitými okny plněná jodem I<sub>2</sub> (obr. B).

**Kontakt:** doc. Ing. Josef Lazar, Dr. ■ e-mail: joe@isibrno.cz ■ tel: 541 514 253  
**Podrobnější informace:** <http://www.isibrno.cz/kgs/>

### Laserní interferometrické měřicí systémy

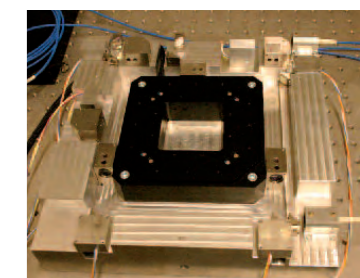
Laserní interferometrické měřicí systémy využívají interference dvou a více laserových vln k odměřování neznámé vzdálenosti. Jejich využití je velmi široké a lze je použít jak k měření velmi krátkých vzdáleností v řádu milimetrů, tak i pro odměřování vzdáleností v řádech jednotek až desítek metrů. Přitom primární rozlišení měření se stále pohybuje v jednotkách až desítnách nanometru.

Systémy zhotovené v ÚPT se používají

- k měření polohy trojosých polohovacích stolků,
- ke kalibraci stupnic celé řady typů snímačů délky,
- k měření indexu lomu plyných prostředí.

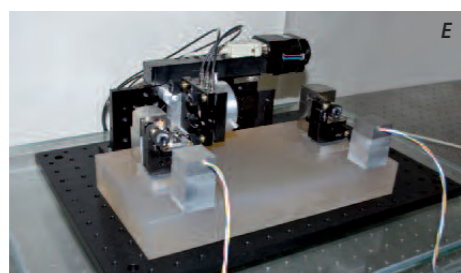
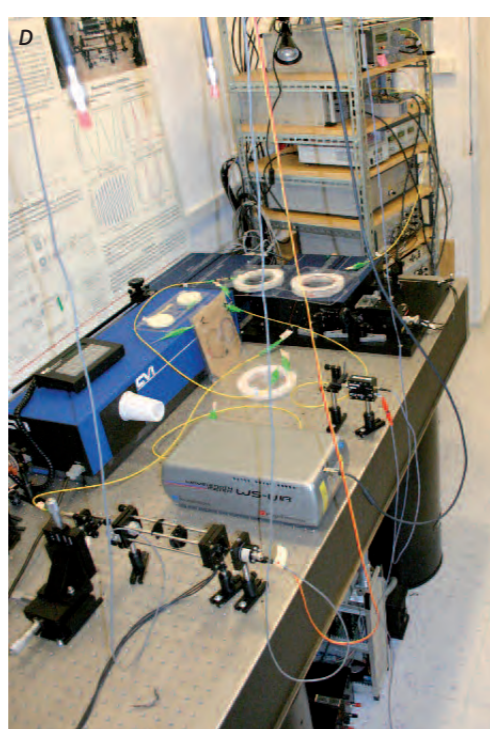
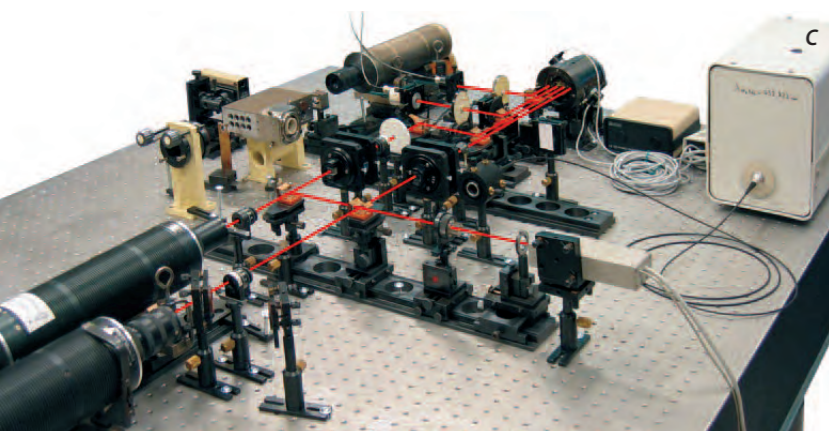
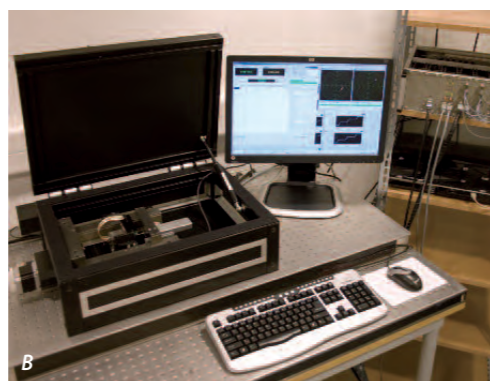
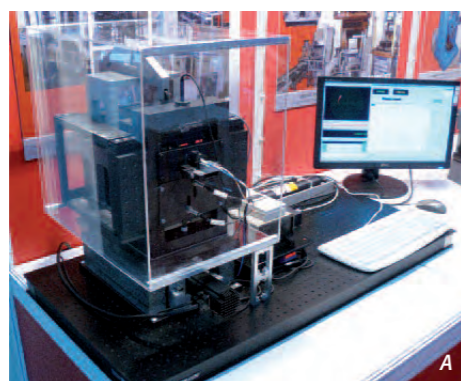
#### Příklady aplikací

- **Interferometrie pro nanometrologii.** Nanometrologie je založena na zobrazování vzorků technikami sondové mikroskopie, např. mikroskopie atomárních sil (AFM). Má-li jít o měření rozměrů v nanosvětě, musí být polohování sondy mikroskopu odměřováno interferometricky s přímou návazností na základní etalon délky (stabilizovaný laser). Sestava pro měření polohy vzorku vychází z nanopolohovacího souřadnicového stolu a systému šesti interferometrů monitorujících polohu stolu ve všech stupních volnosti. Sondový mikroskop je umístěn nad vzorkem. Limity nejistoty měření jsou dané mechanickou tuhostí sestavy a vlivem změn indexu lomu vzduchu. Rozlišení interferometrů je pod 1 nm.
- **Přesné odměřovací systémy a komparátory.** Interferometrické systémy realizované v ÚPT dovolují rozlišení až v desítnách nanometru, tedy na úrovni meziatomových vzdáleností. Praktické využití těchto metod je např. v oblasti kalibrace stupnic různých délkových snímačů, které jsou pak následně využívány v průmyslovém měření.



Příklad víceosého interferometru pro 3D odměřování polohy sondy AFM mikroskopu.

Laserní komparátory pro kalibraci snímačů délky. Vlevo je systém pro kalibraci snímačů ve svislé poloze (obr. A), vpravo pro kalibraci snímačů ve vodorovné poloze (obr. B).



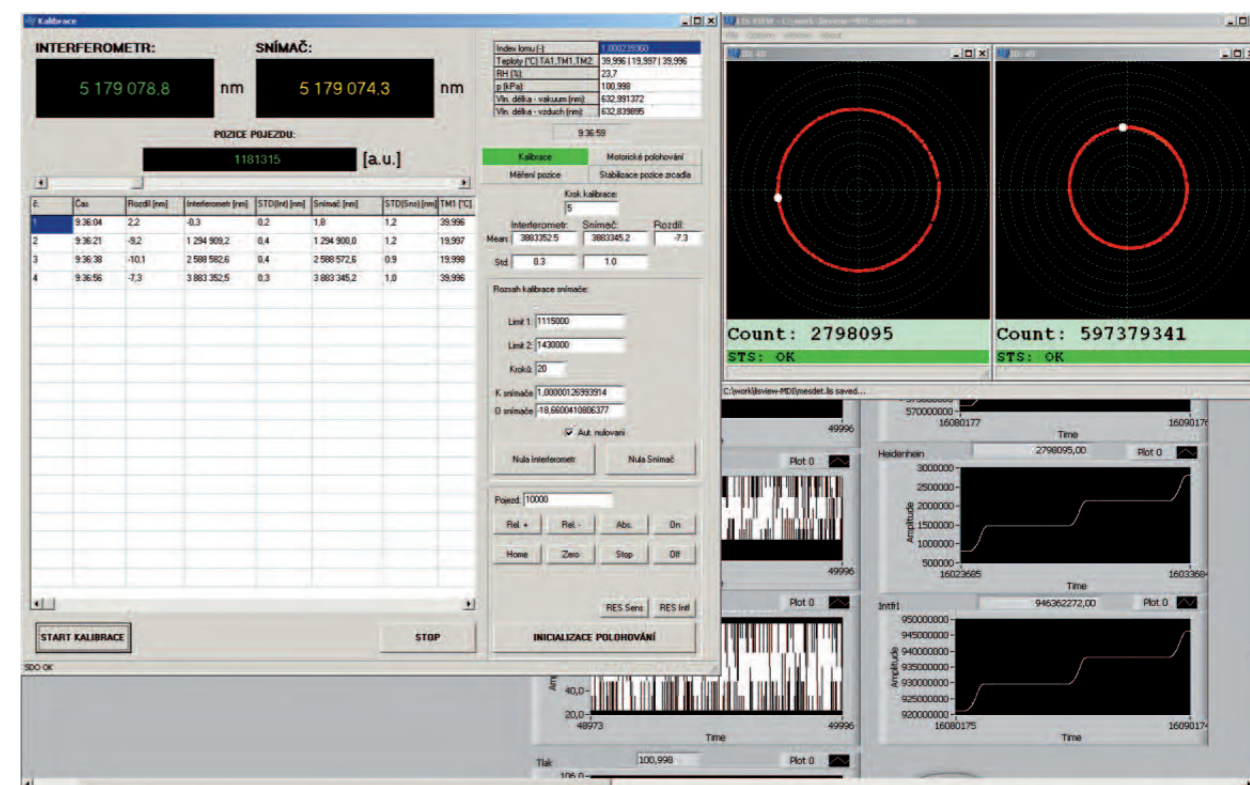
Systém pro měření indexu lomu vzduchu pomocí He-Ne laserů (obr. C).

Systém pro měření indexu lomu pomocí femtosekundového syntezátoru optických frekvencí (obr. D).

Příklad experimentálního laserového interferometru pro měření vzdálenosti s potlačením vlivu indexu lomu vzduchu (obr. E).

- **Měření indexu lomu plyných prostředí.** V laboratořích ÚPT se také zabýváme výzkumem metod měření indexu lomu vzduchu nebo jiných plyných prostředí. K dispozici máme dva systémy pro identifikaci indexu lomu vzduchu, které lze nasadit i v dalších oblastech, např. k měření indexu lomu transparentních prostředí, kapalin i pevných látek.
- **Interferometrie s kompenzací vlivu indexu lomu vzduchu.** Uspořádání s diferenčním měřením vzdálenosti umožňuje kompenzovat vliv změn indexu lomu vzduchu. Základem sestavy interferometru je mechanická reference s velmi malou teplotní roztažností, na kterou je fixována vlnová délka laseru prostřednictvím součtu vzdáleností odměřovaných dvěma protiběžnými interferometry.

**Kontakt:** Ing. Ondřej Číp, Ph.D. ■ e-mail: [ocip@isibrno.cz](mailto:ocip@isibrno.cz) ■ tel: 541 514 254  
doc. Ing. Josef Lazar, Dr. ■ e-mail: [joe@isibrno.cz](mailto:joe@isibrno.cz) ■ tel: 541 514 253  
**Podrobnější informace:** <http://www.isibrno.cz/kgs/>



### Speciální elektronika a software

Návrhy speciální elektroniky pro řízení experimentů včetně software představují významnou část aktivit výzkumného týmu.

Jedná se o:

- nízkosumové proudové kontroléry pro laserové diody,
- přesné teplotní kontroléry pro laserové diody a pro absorpční kyvety,
- číslicové systémy synchronní demodulace,
- karty pro digitalizaci signálů s AD a DA převodníky,
- vysokonapěťové zesilovače pro piezoelektrické měniče,
- kompletní detekční řetězce pro derivační i frekvenčně-modulační spektroskopii,
- komunikační interface pro TCP/IP, USB a CAN sběrnice a sítě,
- napájecí zdroje a fotodetektory.

Software vyvinutý v oddělení laserů ÚPT zahrnuje:

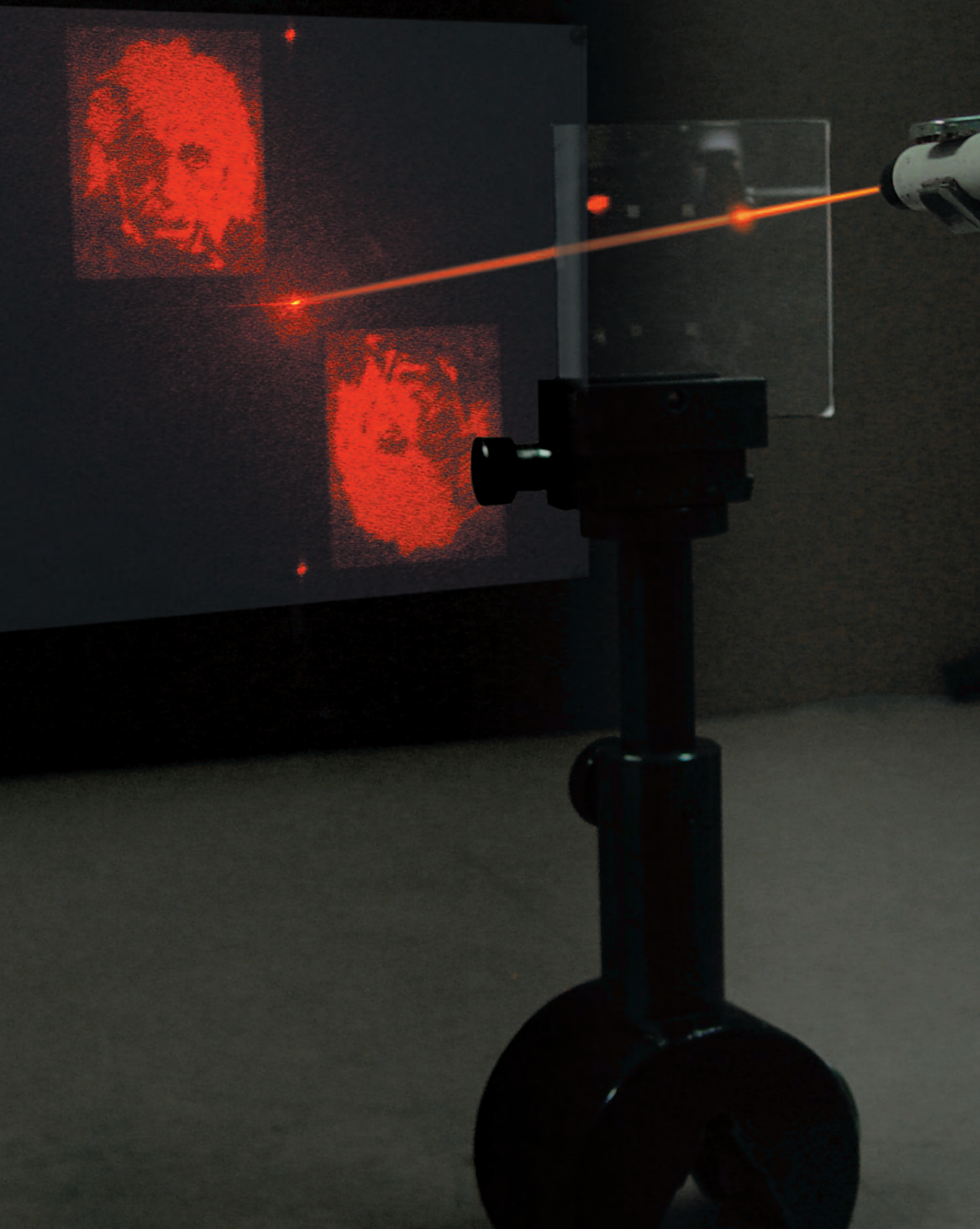
- originální algoritmus pro linearizaci stupnice laserového interferometru,
- komunikační server pro zpracování a přenos dat po síti TCP/IP v reálném čase,
- ovladače pro prostředí LabView,
- řídicí software pro sběrnici CAN.

**Kontakt:** Ing. Ondřej Číp, Ph.D. ■ e-mail: [ocip@isibrno.cz](mailto:ocip@isibrno.cz) ■ tel: 541 514 254  
doc. Ing. Josef Lazar, Dr. ■ e-mail: [joe@isibrno.cz](mailto:joe@isibrno.cz) ■ tel: 541 514 253  
**Podrobnější informace:** <http://www.isibrno.cz/kgs/>



Příklad programového vybavení řídicího systému kalibračních komparátorů ÚPT.

Kompletní elektronika pro stabilizaci frekvence laserových diod (dole).



Laboratoř elektronové litografie v ÚPT se dlouhodobě zabývá problematikou a studiem technologických principů vytváření struktur submikrometrových rozměrů v různých materiálech pevné fáze. Výsledky prací laboratoře jsou využívány odbornými, vědeckými a vysokoškolskými pracovišti a v některých případech i soukromými firmami.

V posledním období byly práce v laboratoři zaměřeny na:

- technologie přípravy struktur pro fázové difrakční optické elementy,
- průmyslové využití elektronové litografie pro tzv. syntetické, respektive CGH počítačem generované hologramy (viz. obrázek na protější straně).

Těmto aplikacím předcházela nutná modernizace používaného zařízení – elektronového litografu BS600, jehož fyzikální koncepce byla vypracována a vyvinuta v ÚPT v druhé polovině sedmdesátých let minulého století na úrovni, která po provedených zlepšeních stále představuje světovou špičku.

## Elektronová litografie

Elektronový litograf s tvarovaným svazkem (Tesla BS 600+) umožňuje rychlý zápis (expozici) obrazové informace do tenké vrstvy elektronového rezistu na křemíkových nebo skleněných podložkách ve velmi vysokém rozlišení. **Základní krok** námi provozovaného zařízení je **50 nm**, realizovatelná **hustota čar** je **2.000 čar/mm**. Vyvoláním exponované vrstvy rezistu se vytváří planární rezistová maska, přes kterou je možné opracovat povrch podložky (substrátu) nebo tenkou funkční vrstvu (zpravidla kov nebo dielektrikum) předem nanesenou na nosném substrátu.

### Aplikace elektronové litografie:

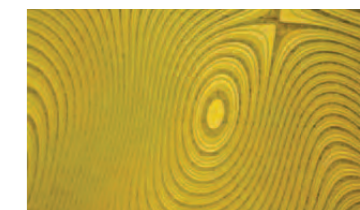
- velkoplošné mikrostruktury pro difrakční optické elementy tvarující laserový svazek,
- submikrometrové difrakční struktury pro aplikace průmyslové holografie,
- struktury v tenkých vrstvách kovů a dielektrik na křemíkových podložkách pro biosenzory a vodivostní chemické senzory.

### Vybrané výsledky výzkumu využívané průmyslovými partnery:

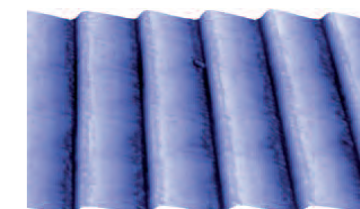
- Na základě technických podkladů dodaných zadavatelem bylo vytvořeno a předáno několik desítek vzorků velkoplošných difrakčních holografických struktur ve vrstvě polymerního elektronového rezistu.
- Podle požadavků zadavatele bylo vytvořeno a předáno několik kusů **rozměrových normálů pro optickou a elektronovou mikroskopii**. Přesnost normálů se expozicí kalibrovaného expozičního pole elektronového litografu odvozuje od laserových interferometrů. Normál obsahuje několik struktur, mezi nimi zpravidla měřítko, odměřovací mřížky a geometrické obrazce s popisem.

**Kontakt:** doc. Ing. Vladimír Kolařík, Ph.D. ■ e-mail: kolariq@isibrno.cz ■ tel: 541 514 336  
**Podrobnější informace:** <http://www.isibrno.cz/teams/EBL/>

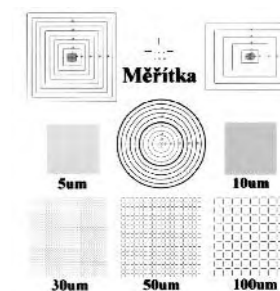
Tvarování laserového svazku na holografické struktuře CGH (str. 42).



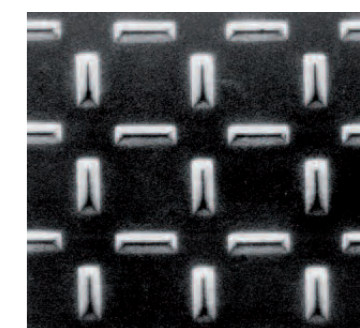
Detail obecné difrakční víceúrovňové struktury (optický mikroskop, zvětšení 200x).



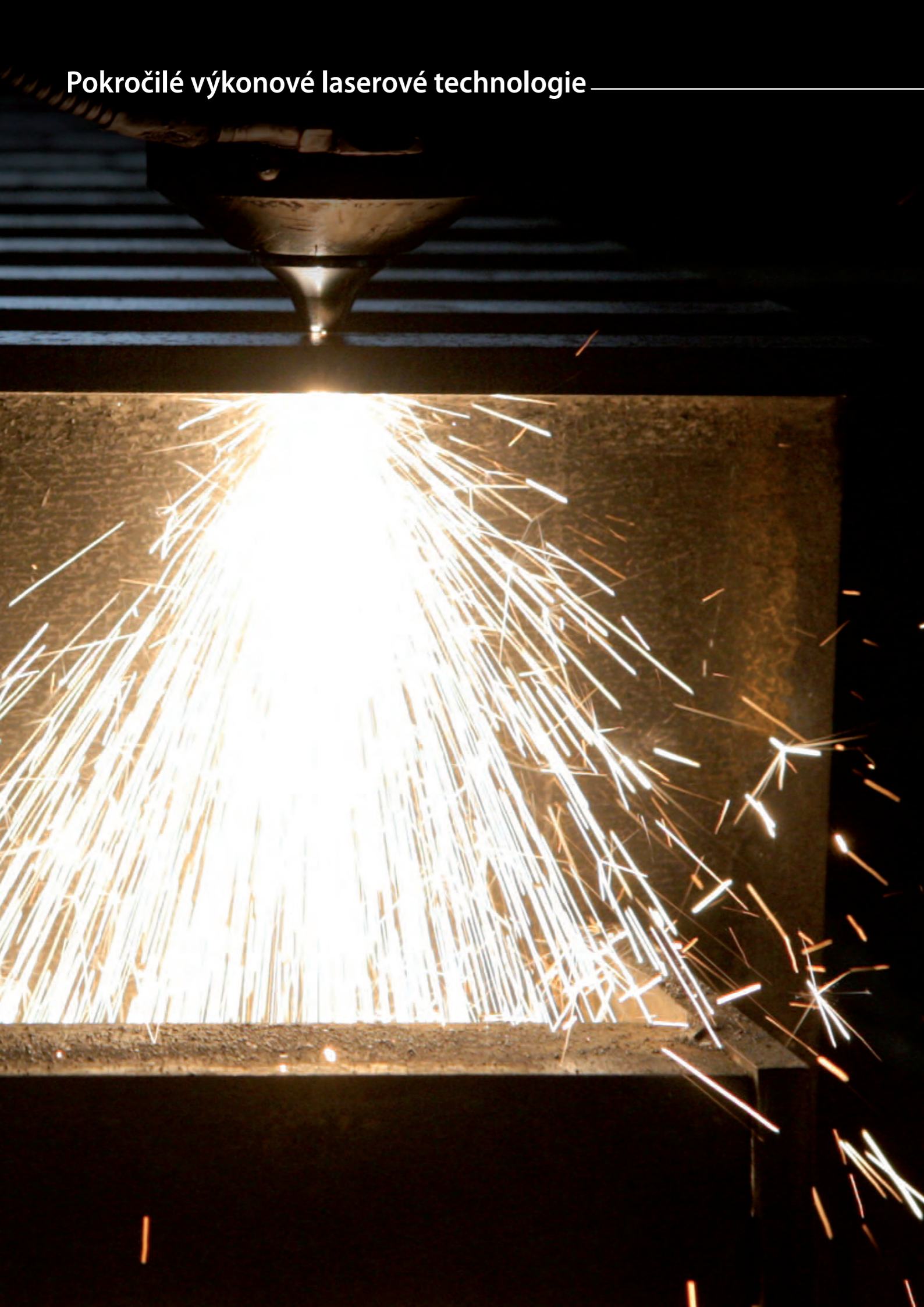
Reliéf pravidelné nesymetrické difrakční struktury (perioda 4 μm, hloubka 0,5 μm).



Struktura metrického normálu, celkový pohled, velikost 3x3 mm.



Detail metrického normálu, odměřovací mřížka s roztečí 5 μm.



Technologie využívající laser ke **svařování, vrtání, řezání nebo kalení materiálů** patří v dnešní době mezi progresivní a perspektivní metody umožňující výrobním subjektům zvyšovat přidanou hodnotu svých výrobků nebo vyvíjet výrobky nové, jinými metodami nevyrobitelné. Strojní a technologická náročnost však brání hlavně malým a středním podnikům si taková zařízení pořídit. Jejich ekonomický přínos není okamžitý, poněvadž je třeba zdokonalovat postupy a zejména u laserového svařování provádět řadu technologických zkoušek. Také z těchto důvodů vzniká v ÚPT pracoviště, které bude nabízet využití nejpokročilejších laserových technologií i formou služby.

*Řezací laser v provozu (str. 44).*

## Pokročilé výkonové laserové technologie

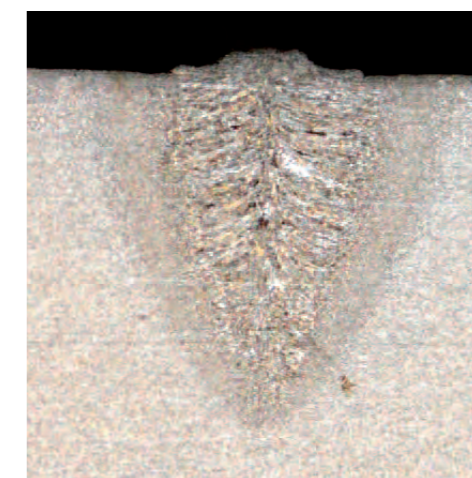
Princip **laserového svařování** využívá vysoké hustoty energie (řádově  $10^7 \text{ W cm}^{-2}$ ) v ploše ozářené svazkem, která způsobí okamžité odpaření materiálu s minimální tepelnou disipací do okolního objemu. Vytváří se tak válcová dutina vyplněná parami kovu o takovém tlaku, že brání slití tekutého kovu na stěnách dutiny. Pokud se paprsek vhodnou rychlostí pohybuje po povrchu, dutina sleduje pohyb paprsku a lze tak v porovnání s jinými metodami dosáhnout **velmi štíhlého svaru s průvarem do velké hloubky**. Proces nemusí probíhat ve vakuu – do místa svaru je přiváděna vhodná ochranná atmosféra k potlačení oxidace svarové lázně. Pokud je souběžně s paprskem přiváděn do místa tavení procesní plyn s vyšším tlakem, kapalný kov je ze spáry vytlačován a místo svařovací dochází k **řezání materiálu**.

Oproti ostatním tepelným metodám svařování či dělení **minimalizuje užití laseru tepelné ovlivnění materiálu** a tím i jeho následné deformace.

V ÚPT je využíván **vláknový laser**, ke kterému jsou připojeny dvě technologické aplikační hlavy pro **dělení a svařování materiálů**. Řezací hlava je na rameno robota upevněna přes vlastní nezávislou lineární osu, která pomocí zabudovaného zpětnovazebního systému udržuje konstantní odstup řezné trysky od materiálu, což je jeden z kritických požadavků na řezný proces. Svařovací hlava je vybavena koaxiální kamerou pro přímý pohled na probíhající svařovací proces. Polohování aplikačních hlav zajišťuje šestiosý robot, a doplňkové polohování opracovávaného dílu vzhledem k robotickému ramenu obstarává dvouosé polohovadlo napojené na řídicí systém robota. Systém tak umožňuje nejvyšší možnou flexibilitu polohování.

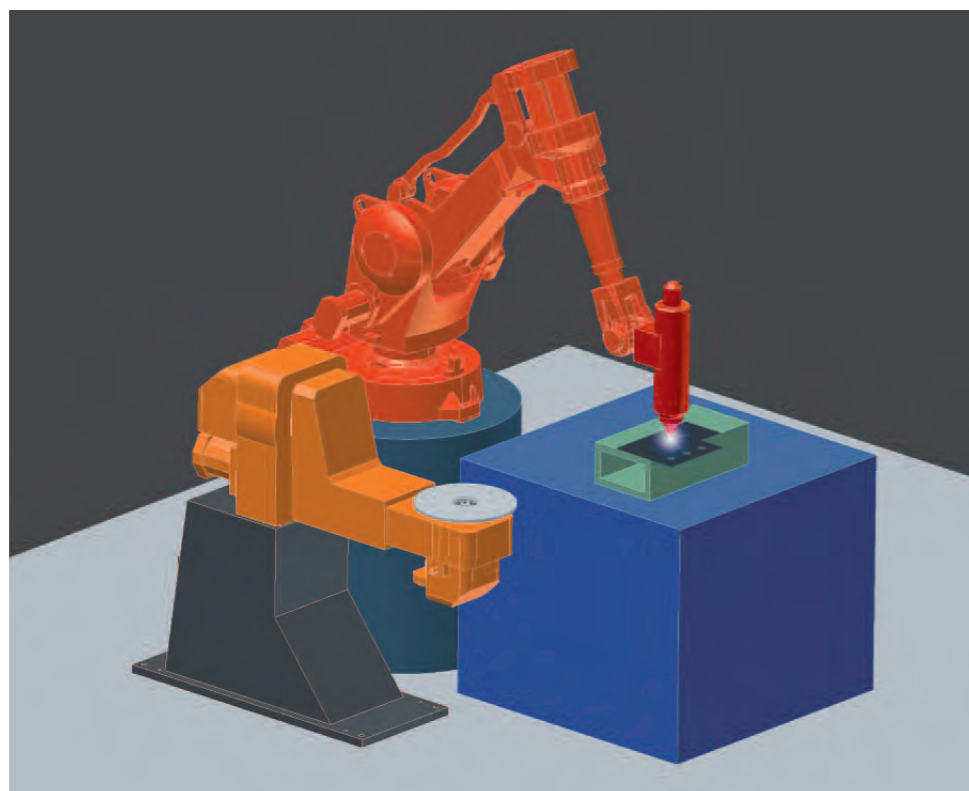
Parametry systému jsou následující:

- výkon laseru 2kW,
- dosah robota 1,6 m,
- nosnost polohovadla 250 kg,
- maximální hloubka průvaru cca 5 mm,
- maximální síla řezu cca 5mm,
- procesní rychlost do 10 m/min.



*Makrosnímek průřezu laserového svaru.*

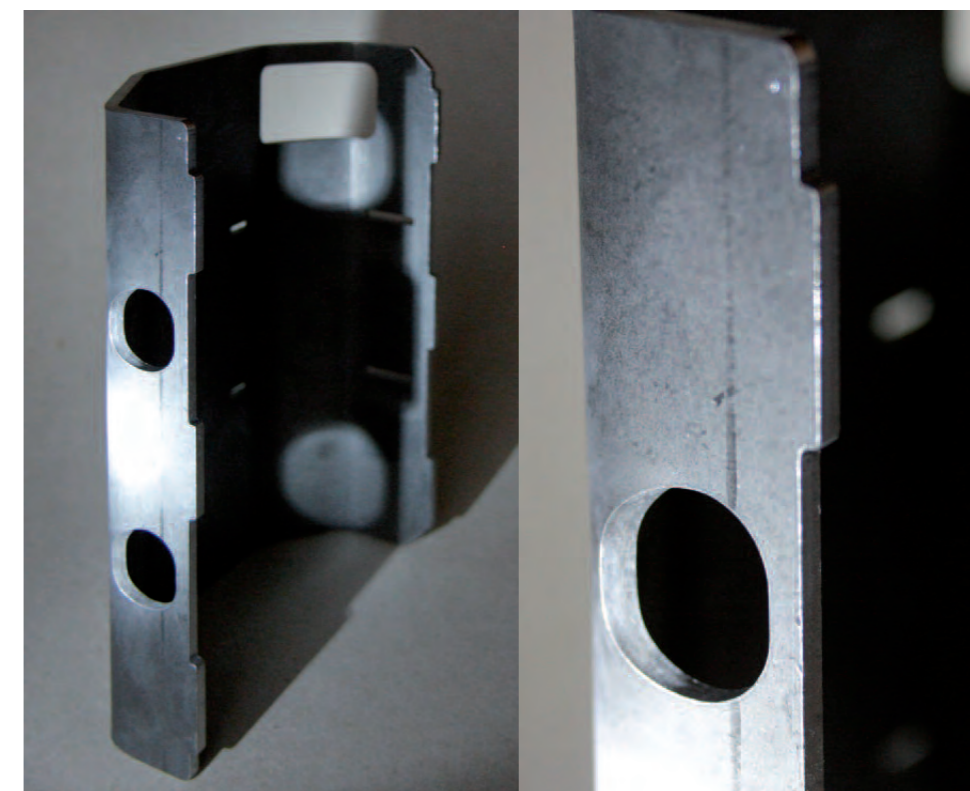
Pracoviště s robotem a polohovadlem.



**Příklady využití výkonového laseru:**

- **Laserové svařování** přeplátováním dvou a více plechů do celkové síly 5 mm, svary natupo do celkové síly 5 mm, svařování dílů ve formě rovných plechů, výlisků, profilů a trubek, svařování materiálů z uhlíkové a nerezové oceli, titanu a dalších kovů a slitin, svařování materiálů s povrchovou úpravou jiným kovem (zpravidla Zn, Al).

Příklad svaru laserem.

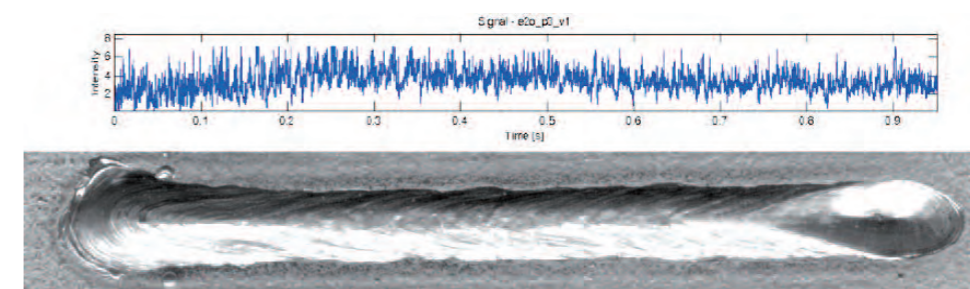


Příklady součástí řezaných laserem (celek a detail).

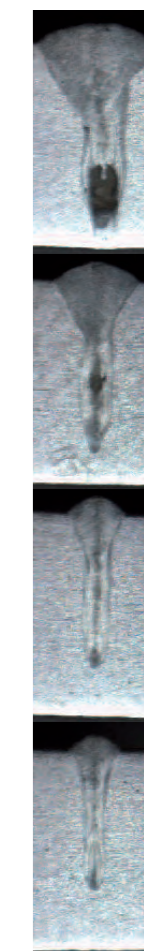
Záznam intenzity záření plasmatu během laserového svařování (vlevo dole).

Ukázka závislosti tvaru svaru na parametrech svařovacího procesu (dole).

- **Laserové dělení** materiálů ve formě rovných plechů, výlisků, profilů a trubek do síly cca 5 mm, materiálů zhotovených z uhlíkové a nerezové oceli, titanu a dalších kovů a slitin, materiálů s povrchovou úpravou jiným kovem (zpravidla Zn, Al) nebo s ochrannou fólií.
- **Laserové vrtání** otvorů do kovových a keramických materiálů se při použití laseru v pulzním režimu vyznačuje vysokou štíhlostí (až 1:30).
- **Bodové a maloplošné povrchové laserové kalení** materiálů schopných vytvářet martenzitickou strukturu, a to do hloubky cca 1 mm.
- **Technologické a prototypové zkoušky** pro testování nových postupů.
- **Výzkum svařovacího procesu** zaměřený na diagnostiku laserového svařovacího procesu, aktivní řízení svařovacího procesu a studium svařitelnosti materiálů.



**Kontakt:** Ing. Petr Jedlička, Ph.D. ■ e-mail: jedla@isibrno.cz ■ tel: 541 514 327  
 RNDr. Libor Mrňa, Ph.D ■ e-mail: mrna@isibrno.cz  
**Podrobnější informace:** <http://www.isibrno.cz/>







Průvodce  
aplikačními možnostmi  
Ústavu přístrojové techniky  
AV ČR, v.v.i.

**Koncepce publikace:** prof. RNDr. Pavel Zemánek, Ph.D. ■ Ing. Oldřich Sobotka, MBA  
Ing. Bohdan Růžička, Ph.D.

**Autoři textů:** Mgr. Ota Samek, Dr. ■ prof. RNDr. Pavel Zemánek, Ph.D.  
Ing. Martin Zobač, Ph.D. ■ Ing. Ivan Vlček, Ph.D. ■ Ing. et Ing. Vilém Neděla, Ph.D.  
Ing. Aleš Srnka, CSc. ■ Ing. Tomáš Králík, Ph.D. ■ Ing. Pavel Hanzelka  
doc. Ing. Josef Lazar, Dr. ■ Ing. Ondřej Číp, Ph.D. ■ doc. Ing. Vladimír Kolařík, Ph.D.  
RNDr. Libor Mrňa, Ph.D. ■ Ing. Petr Jedlička, Ph.D.

**Fotografie:** archiv ÚPT AV ČR,  
Musil, Hybská – architektonický atelier, s.r.o. (vizualizace budovy)

**Grafická úprava:** Alena Jedličková

**Tisk:** CCB, spol. s r. o.

Vydal Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i., Královopolská 147, Brno, 2010  
Publikace je k dispozici v elektronické podobě na internetových stránkách  
<http://alisi.isibrno.cz>



AKADEMIE VĚD  
ČESKÉ REPUBLIKY



EVROPSKÁ UNIE  
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ  
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



OP Výzkum a vývoj  
pro inovace