

Posudek disertační práce Ing. Tomáše Kratochvíla

## STUDIUM MATRIČNÍCH EFEKTŮ V LIBS SPEKTROMETRII

Spektroskopie laserem buzeného plazmatu je poměrně nová a stále se rozvíjející metoda prvkové analýzy. Jistým omezením pro rutinní využití metody je poměrně značné zatížení matričními efekty. Předložená práce si klade za cíl přispět k pochopení některých matričních jevů a k jejich následně eliminaci.

Cíle práce jsou definovány v úvodní kapitole. V první kapitole teoretické části je popsán princip techniky LIBS. Další, velmi obsáhlá, kapitola je věnována vlastním matričním efektům, způsobeným vlivem složení a fyzikálními vlastnostmi matrice, vlastnostmi laserů a vlivem pracovní atmosféry. Závěr teoretické části se zabývá metodami eliminace matričních jevů. Kapitola svědčí o velmi dobré teoretické připravenosti autora a přináší bohatý přehled dosavadního poznání v oboru techniky LIBS.

Experimentální část je členěna do tří tematických celků, ve kterých se řeší praktické problémy při aplikaci metody LIBS. Je zaměřena na tři rozdílné matriční efekty vyskytující se při těchto aplikacích. Dosažené výsledky jsou, poněkud neobvykle, prezentovány formou článků z odborného tisku, což poněkud narušuje návaznost jednotlivých kapitol. První část je věnována studiu vlivu tvaru a velikosti částic při stanovení vanadu ve vzorcích katalyzátorů na bázi hexagonální mesoporézní siliky. Výsledky získané metodou LIBS jsou porovnávány s výsledky stanovení V metodou rentgenové fluorescenční spektrometrie (XRF). Zde bych se chtěl dotázat, jaké jsou analyzované objemy vzorků a z jaké hloubky pochází analytický signál u obou metod. Pro posouzení formy vyloučení V na částicích siliky u obou typů vzorků by bylo vhodné provést rentgenovou analýzu ve spojení se skenovacím elektronovým mikroskopem.

Další část se zabývá vlivem atmosféry a úpravy vzorku při stanovení fluoru ve vzorcích skloionomerního cementu a organického pigmentu. Tato část přináší zajímavé poznatky o vlivu pracovní atmosféry a rychlou metodu stanovení fluoru v pevných vzorcích. Vzhledem k problémům při stanovení fluoru v pevných vzorcích jinými metodami jsou získané výsledky perspektivní pro praktické využití.

Poslední část se zabývá vlivem parametrů laseru při stanovení titanu v ultratenkých vrstvách. Jsou zde prezentovány metody stanovení Ti ve dvou naprosto odlišných vzorcích. Prvním je tkanina napuštěná nanočásticemi  $\text{TiO}_2$ . Metodou LIBS zde byla porovnávána s metodou XRF. Ve druhém případě byl stanovován titan ve velmi tenké vrstvě vyloučené na

ocelovém povrchu s mezivrstvou cinu. V tomto případě byly, vedle metod LIBS a XRF, použity metody hmotnostní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem s laserovou ablací (LA-ICP-TOF-MS) a spektroskopii fotoelektronů vybuzených rentgenovým zářením (XPS). Pro posouzení vhodnosti metod LIBS a XRF pro oba typy vzorků bych opět považoval za vhodné odhadnout objem a hloubku vzorku, ze které pochází vyhodnocovaný analytický signál. Dále bych se chtěl zeptat, zda autor uvažoval o použití optické spektrometrie s doutnavým výbojem (GDOS) pro analýzu tenké vrstvy a profilovou analýzu Ti na ocelovém povrchu.

Některé získané poznatky jsou diskutovány v úvodech jednotlivých kapitol. Všechny výsledky jsou pak přehledně shrnuty v Závěru. Jsou zde také diskutovány jednotlivé výhody a nevýhody metody LIBS, což může sloužit jako pomůcka při výběru metod pro řešení různých analytických problémů.

Práce obsahuje 78 citací, v převážné většině ze zahraničního odborného tisku. Vyzdvihnout je třeba vlastní publikační činnost autora. Jedná se o 6 publikací v renomovaných zahraničních odborných časopisech, 7 příspěvků na mezinárodních a 3 příspěvky na národních vědeckých konferencích.

Po formální a jazykové stránce je práce zpracovaná velmi pečlivě, neobsahuje prakticky žádné formální chyby.

#### **Závěr:**

Předložené disertační práce Ing. Tomáše Kratochvíla svědčí o velmi dobré teoretické připravenosti autora a jeho schopnosti kvalifikovaně řešit vědeckotechnické problémy v rámci daného vědního oboru.

Práce zcela splnila vytčené cíle a přináší nejen nové poznatky v dané problematice, ale také originální experimentální a metodické řešení dané problematiky.

Hodnocená práce plně odpovídá požadavkům kladených na práce daného typu. Disertační práci Ing. Tomáše Kratochvíla doporučuji k obhajobě a po jejím obhájení udělení vědeckého titulu Ph.D.

V Ostravě dne 22.10.2015



doc. Ing. Vladimír Tomášek, CSc.

Centrum nanotechnologií

VŠB – TU Ostrava



## Oponentský posudek disertační práce

Student: Ing. Tomáš Kratochvíl

Název práce: Studium matričních efektů v LIBS spektrometrii

Oponent: prof. Ing. Oto Mestek, CSc.

Pracoviště: Ústav analytické chemie, Vysoká škola chemicko–technologická v Praze

Studium a posouzení disertační práce Ing. Tomáše Kratochvíla bylo pro mě velice zajímavým úkolem, který mi umožnil seznámit se jak se zajímavými výsledky, tak i hlouběji s pro mě dosud relativně novou formou disertační práce.

### Struktura práce a připomínky k textu

Disertační práce je psaná pro mě relativně nově používanou formou podobné té, která se používá v habilitačních pracích: jedná se o soubor publikací s komentářem doplněný o úvodní rešeršní kapitolu. Výhodou tohoto přístupu je to, že do disertace se dostávají texty prošlé recenzním řízením a autor se v komentáři může soustředit pouze na hlavní fakta. Nastavení hranice mezi publikacemi a komentářem je však v těchto typech prací citlivým úkolem, kterého se však Ing. Kratochvíl zhostil velice dobře. Komentáře k jednotlivým zařazeným publikacím výstižně a vyčerpávajícím způsobem shrnují obsah prací, aniž by zasahovaly do zbytečných podrobností obsažených v publikacích. Výtky však mám k úvodním kapitolám. V kapitole 1 Princip techniky LIBS zahrnující necelou jednu stránku bych očekával detailnější popis techniky, zejména vysvětlení některých pojmů (např. jednopulzní a dvoupulzní odpaly), se kterými se v následujících kapitolách operuje jako již se známými. Následující kapitoly úvodní části disertační práce jsou věnovány již hlavnímu tématu, tedy matričním vlivům. Velice oceňuji široký rozsah rešeršní práce, která se snaží poskytnout co nejvíce aspektů vlivu matrice. Přes nespornou snahu doktoranda o nalezení zobecňujících pohledů se bohužel tato část práce občas stává pouhou masou jednotlivých informací. Je však zřejmé, že při tak velkém počtu různých matričních jevů a současně omezeném množství publikovaných komplexnějších studií, by se jednalo o velmi obtížný úkol.

Po jazykové stránce práce bohužel nijak nevyčnívá na obvyklou úroveň vyjadřování. Nejzřetelněji se to projevuje na slovosledu vět, který více odpovídá slovosledu originálních prací, než plynulé češtině. V textu se projevují nejednotnosti v psaní „s – z“. Na str. 15 lze tak např. na jednom řádku nalézt puls i pulz. Po formální stránce práce odpovídá standardu odborných prací a je srozumitelná. Vytknout je potřeba pouze rezignaci na psaní symbolů veličin kurzívou, což bohužel ve spojení s faktem, že v seznamu zkratk jsou některé zkratky uváděny v jiné podobě, než ve vlastním textu, vede občas k větám, nad jejichž smyslem je potřeba trochu přemýšlet. Zcela odmítnout však musím používání zastaralých jednotek stojících mimo SI, jako jsou jednotky tlaku Torr a fyzikální atmosféra.



## Výsledky práce

Současná analytická chemie nabízí řadu výtečných detekčních systémů. V oblasti stopové prvkové analýzy mezi ně zcela určitě patří emisní spektrometrie s nejrůznějšími metodami excitace spekter, které umožňují velice citlivou multielementární analýzu. Analytik se často dostává do situace, kdy limitujícím faktorem majícím hlavní vliv na kvalitu jeho práce není vlastní detekční systém, ale např. možné kontaminace během zpracování vzorku, nedostatečné množství vzorku, jeho chemický charakter neumožňující jednoduchý rozklad či požadavek na rychlost analýzy. Použití emisní spektrometrie s buzením spekter laserem (LIBS) pro prvkovou analýzu je tedy logickým krokem, který tyto problémy řeší. LIBS je technika, která uplatnění nalézá v povrchové analýze pevných materiálů nejrůznějšího typu sice již desítky let, dosud však nedochází masového požití. Důvodem mohou být i matricové vlivy, které nedovolují jednoduché přenášení zkušeností z jednoho typu vzorků na jiný.

Doktorand se během svého studia vypořádal s danou problematikou přesvědčivým způsobem, o čemž svědčí zejména vysoký počet prací otištěných v prestižních časopisech. Kopie těchto prací následně tvoří hlavní část předložené disertační práce. Jedná se o tři okruhy:

- stanovení vanadu v katalyzátorech na bázi  $\text{SiO}_2$ , zkoumán byl vliv granulometrie práškového vzorku a hledána byla optimální příprava vzorku pro analýzu,
- stanovení fluoru ve skloionomerních cementech a organických barvivech, zkoumána byla příprava vzorku a vliv ochranné atmosféry při analýze,
- stanovení titanu v ultratenkých vrstvách nanesených na nejrůznějších substrátech, zkoumány byly zejména podmínky excitace spekter.

Výsledky ve všech zpracovávaných tématech jednoznačně znamenají posun ve využití spektrometrie LIBS a jsou významným příspěvkem k rozvoji metodiky. Osobně si cením zejména výzkumu stanovení fluoru, protože jeho kvantitativní převedení do roztoku, se kterým pracuje většina ostatních metod, je velice pracné. Totéž ostatně platí i pro stanovení titanu vázaného jako  $\text{TiO}_2$ . Ve studii věnované stanovení titanu byly demonstrovány i další přednosti spektrometrie LIBS kromě toho, že pracuje s relativně jednoduše upraveným pevným vzorkem bez nutnosti rozkladu. Jedná se zejména o možnost mapování povrchů a měření tloušťky vrstev.

## Otázky a připomínky

K práci mám pouze omezený počet dotazů:

Není mi zcela jasný vzorec na str. 16. Pokud má být tento vztah základem pro tvorbu kalibračních křivek, očekával bych spíše, že veličina  $N$  bude populace volných atomů analytu, nikoliv populace elektronů. Dále prosím o bližší vysvětlení funkce  $Z$  uváděné jako funkce „základního stavu“. Nejedná se spíše o partiční funkci? Ta však necharakterizuje jednotlivé stavy, ale celou populaci atomů, případně elektronů.

Jakým přechodům v atomu fluoru odpovídají zvolené emisní linie v oblasti 680 – 690 nm? Jedná se o emisní čáry atomů fluoru, nebo jeho sloučenin? Či opačně, lze v LIBS spektru nalézt i čáry sloučenin fluoru, tak jako např. v jiskrových spektrech lze nalézt emisní čáry ArF?

Dále mám dva náměty pro doplnění plánované přednášky:

Mohl by doktorand provést kritické srovnání LIBS s dalšími potenciálními vhodnými metodami pro analýzu pevných vzorků: XRF a jiskrovou emisní spektrometrií?

Mohl by doktorand kriticky posoudit často zdůrazňovanou vhodnost LIBS pro dálkovou analýzu?

### **Závěry**

Disertační práce Ing. Tomáše Kratochvíla představuje ucelené dílo, které přináší nesporný posun v metodice spektrometrie LIBS. Výše uvedené výtky nijak jeho význam a kvalitu nesnižují.

Autor ve své disertační práci **prokázal** schopnost samostatné tvůrčí práce v daném oboru.

Práce **splňuje** požadavky standardně kladené na disertační práce v daném oboru.

Práci proto **doporučuji přijmout** k obhajobě.

V Praze 6.10.2015

prof. Ing. Oto Mestek, CSc.







## Oponentský posudek na disertační práci

Ing. Tomáše Kratochvíla

### STUDIUM MATRIČNÍCH EFEKTŮ V LIBS SPEKTROMETRII

#### Aktuálnost zvoleného tématu

Téma disertační práce je aktuální z hlediska zvolené spektroskopické analytické metody s využitím laserem buzeného plazmatu (LIBS), která je v různých experimentálních uspořádáních předmětem zájmu a studia v mezinárodním měřítku. Metoda LIBS umožňuje analyzovat pevné vzorky bez předchozího převodu do roztoku. Tato přednost se uplatňuje v předložené doktorské disertační práci ve všech třech řešených tématech: i) při stanovení vanadu jakožto katalyzátoru na/v křemičitém substrátu; ii) při stanovení fluoru v materiálu pro stomatologii a v organickém pigmentu; iii) při stanovení titanu v textilních opatřených nanočásticemi oxidu titaničitého a stanovení povrchové hustoty Ti v ultratenkých vrstvách deponovaných na kovovém substrátu.

Témata jsou velmi vhodně zvolena. Rozklad katalyzátoru s nosičem je náročný, fluor patří k obtížně stanovitelným prvkům (omezený výběr metod, ztráty při rozkladu) a stanovení titanu v tenkých vrstvách pomocí leptání kyselinou je zdlouhavé. Metody povrchové analýzy částicovým svazkem jsou nákladné.

Analýza práškových materiálů se většinou provádí po slisování do kompaktních tablet. Tato technika selhává v případě, kdy není k dispozici dostatečné množství vzorku a jeho ředění pojivem způsobuje zhoršení meze stanovitelnosti. Proto je vhodné rozvíjet techniku nanosení tenké vrstvy práškového materiálu na adhezivní podklad, což je přístup použitý a rozvíjený v předložené disertační práci.

Jednotlicí myšlenkou práce je matrix efekt, tedy vliv způsobující systematickou signifikantní odchylku hodnoty výsledku od správné/pravdivé hodnoty. Velikost matrix efektu závisí na vlastnostech vzorku a jeho složek a na parametrech použitého laserového systému a dalších podmínkách analýzy, jako je například použité plynné prostředí, v němž se ablace/excitace uskutečňuje. V případě práškového materiálu přistupuje navíc velikost částic vzorku a distribuce těchto velikostí.

Předložená disertační práce se zabývá výše uvedenými vlivy a studuje je na konkrétních analytických aplikacích publikovaných v šesti původních vědeckých pracích.

**Všechna tři zvolená témata disertační práce lze považovat za vysoce aktuální v oblasti výzkumu LIBS a odpovídají požadavkům na disertační práci v doktorském studijním programu „P2837“.**

#### Zvolené metody zpracování

Disertační práce se skládá ze stručného úvodu, teoretické a rešeršní části zabývající se vysvětlením principu LIBS, definicí matrix efektu, vlivem složení matrice a jejich fyzikálních vlastností na signál a dále přehledem používaných ablačních laserových systémů pro LIBS a jejich různých konfigurací a režimů. Pozornost je věnována vlivu složení a tlaku okolní pracovní atmosféry a metodám korekce matričního efektu.

Kapitola nazvaná Vlastní práce je pojata jako soubor tří podkapitol a představuje komentovaný soubor publikovaných prací.

První podkapitola je věnována vlivu tvaru a velikosti částic práškového vzorku na signál a obsahuje stručný komentář ke dvěma publikovaným pracím, které se zabývají stanovením vanadu



jakožto katalyzátoru v/na křemičitém porézním substrátu. Vzhledem k vlastnostem vzorku byl upřednostněn méně používaný a studovaný přístup spočívající v nanesení práškového materiálu na adhesivní pásku místo obvyklého lisování pelet. V první publikované práci byl použit jediný dvoupulzní (komerční) laserový systém, kdežto druhá práce věnovaná mezoporézním katalyzátorům přináší srovnání výše uvedeného komerčního systému LIBS se dvěma stavebnicovými systémy. Srovnávací analýzy byly provedeny v prvním případě metodou EDXRF.

Společným jmenovatelem druhé podkapitoly je stanovení fluoru a současně vliv pracovní atmosféry, v níž je generováno laserové mikroplazma. Obtížně stanovitelný prvek je obsažen v syntetické výplni pro stomatologické účely a v organickém pigmentu. Komentář ke dvěma publikovaným článkům představuje diskusi vlivu dvou pracovních plynů; helia a argonu a integračního časového okna. V případě dentálních výplní byla měření provedena se dvěma aparaturami LIBS, které se liší mimo jiné v geometrickém uspořádání paprsků při dvoupulzní technice LIBS. Z praktických důvodů se ukázalo, že kolineární uspořádání dvoupulzní techniky je vhodnější než ortogonální. Ztráty fluoru těkáním fluorovodíku generovaného při rozkladu pro ověření výsledků LIBS pomocí roztokových technik zdůrazňují význam metody LIBS pro uvedené analýzy. Srovnatelné výsledky poskytla pouze metoda PIGE, omezeně dostupná a navíc nákladná.

Třetí podkapitola je zaměřena na stanovení titanu v textiliích přítomného v podobě nanočástic oxidu titaničitého a dále stanovení povrchové hustoty titanu deponovaného v podobě ultratenké vrstvy na kovovém substrátu. V komentáři ke dvěma publikovaným článkům je srovnávána metoda LIBS s alternativními metodami. Tenké vrstvy byly analyzovány metodami WDXRF, XPS a LA-ICP-MS. Roztoková analýza odleptané vrstvy byla provedena ICP-OES. Různé tkaniny pak byly analyzovány také metodou EDXRF.

Závěr shrnuje výsledky ze tří tematických okruhů. Práce je opatřena odpovídajícími citacemi prostudované literatury, seznamem zkratk a seznamem publikací a odborných příspěvků.

**Zvolené metody zpracování jsou adekvátní studované problematice a odpovídají požadavkům na disertační práci v doktorském studijním programu „P2837“.**

### **Dosažené výsledky, nové poznatky a přínos k dalšímu rozvoji vědy**

#### **i) Vliv tvaru a velikosti částic při analýze vanadu**

Tomuto tématu jsou věnovány 2 publikované práce, které se podařilo umístit do významných recenzovaných mezinárodních periodik s impaktním faktorem. Prvním je časopis Talanta, který reprezentuje platformu pro uveřejňování původních prací s přínosem v oboru analytická chemie, druhým je Journal of Analytical Atomic Spectrometry, který se vymezuje zaměřením na základní a aplikovaný výzkum v oblasti analytických metod založených na atomové optické a hmotnostní spektrometrii a s nimi spojených kombinovaných technik. Obě práce prošly náročným recenzním řízením a byly citovány v recenzovaných časopisech s impaktním faktorem. Práce se doplňují; druhá z nich opravuje neúplné závěry z experimentů publikovaných v první práci. Autor disertace v komentáři vysvětlil a zdůvodnil závěry z první publikace a současně formuloval nový závěr významný z hlediska mletí a homogenizace práškových materiálů pro LIBS. Přínos této části práce spočívá v demonstraci vlivu velikosti částic práškových vzorků na analytický signál a v použití tenké vrstvy částic nanesené na adhesivní podklad.

#### **ii) Vliv atmosféry a úpravy vzorku v analýze fluoru**

Téma je řešeno ve 2 pracích, které byly publikovány v mezinárodních recenzovaných časopisech s impaktním faktorem: Spectrochimica Acta Part B Atomic Spectroscopy a Journal of Applied and Laser Spectroscopy. První práce byla již citována, druhá vzhledem ke krátké době uplynulé od uveřejnění nikoliv. Hlavním přínosem je vypracování metod na přímé stanovení fluoru bez rozkladu vzorku a dále v prostudování vlivu pracovní atmosféry v ablační komoře.

#### **iii) Vliv parametrů laseru při analýze titanu**

Také poslední téma je pojednáno ve 2 publikacích v mezinárodních recenzovaných časopisech s impaktním faktorem: Journal of Applied Spectroscopy a Journal of Analytical Atomic Spectrometry. Práce týkající se analýzy textilií nebyla doposud vzhledem ke krátké době uplynulé od publikování citována, o jejím významu však svědčí vysoký počet „stažení“ v síti Research Gate. Práce věnovaná tenkým vrstvám byla citována dvakrát. Přínos prací spočívá ve vytvoření



funkčních metod pro analýzu textilií a tenkých vrstev a v prostudování různých instrumentálních uspořádání a pracovních parametrů.

**Na základě dosažených výsledků považuji obsah disertační práce za velmi podstatný přínos k dalšímu rozvoji vědního oboru.**

### Připomínky a dotazy ke zpracování disertační práce a jejím výsledkům

#### Připomínky

Str. 6., zkratky: Nd:YAG, místo yttrium aluminium granát, je třeba použít český termín yttriohlinitý granát.

#### Matriční efekty

##### 2.1 Vliv složení matrice a poměru prvků

###### 2.1.1 Složení matrice

Str. 13, poslední odstavec, 1. ř.: ... zvyšování sklonu kalibračních křivek... *možná použít běžného termínu směrnice.* Nejasnost v dalším textu: Vyšší intenzitu čar Pb v písku lze přičíst přítomnosti snadno ionizovatelných prvků. *Písek (pokud je míněn křemenný písek, poněvadž písek představuje obecnější pojem z geologického hlediska (např. korálový písek je tvořen uhličitánem vápenatým) je ale obvykle tvořen prakticky oxidem křemičitým a obsahuje velmi malé množství jiných prvků, takže vliv případného obsahu snadno ionizovatelných prvků je zanedbatelný.*

Str. 14, 2. ř.: Větší částice mají menší povrch... *to se netýká pravděpodobně jedné částice, ale srovnání, kdy stejné hmotnostní množství vzorku bude mít při složení z menších částic větší celkový povrch a naopak. Není jasná formulace, že: ... větší částice mají menší povrch, což vede k vyšší povrchové koncentraci sledovaného prvku...*

Str. 14, 2. odstavec: *interpretace obsahu článku není úplně jasná. Na jedné straně se tvrdí, že poměr signálu Si k pozadí koreluje s obsahem Si v matrici, na druhé straně se konstatuje, že i když je Si hlavní složkou matrice, není dostatečně zastoupen v plazmatu.*

Str. 14: poslední odstavec: *Co znamená, že energie plazmatu závisí na matrici vzorku? Jak byla v dané práci měřena energie plazmatu? Co znamená že: ... Hloubka generovaného kráteru odpovídá té části energie, která proniká do částic písku a nezpůsobuje přímo ablaci ... ?*

###### 2.1.2 Vliv minoritních prvků

*Název této podkapitoly by měl být spíše: ... Vliv matrice na signál minoritních prvků ..., m. j. proto, že minoritní prvky ablaci ovlivní nevýznamně. Z prvního odstavce nevyplývá, že by se řešily minoritní prvky, ale hlavní složky.*

##### 2.3 Vlastnosti a uspořádání laserů

První odstavec: formulace ... na základě vzájemného geometrického uspořádání pulsů ... by měla znít spíše ... *na základě vzájemného geometrického uspořádání laserových paprsků...*

##### 2.4 Vliv atmosféry



Str. 30, poslední odstavec kapitoly: *co znamená ... nejvyšší regresní koeficient...? Jedná se o směrnici nebo úsek? Nejedná se spíše o korelační koeficient?*

### 3 Vlastní práce

Poznámka k názvosloví: v *textu práce se používá spojení ... analýza vanadu ... analýza fluoru...* Vhodnější je použít termín *stanovení: stanovují se analyty, analyzují se vzorky.*

### 3.3 Vliv parametrů laseru při analýze titanu

V komentáři k oběma publikacím na str. 71 a 72 je zaměněno číslování komentovaných prací V a VI.

#### **Otázky:**

1. Čím lze vysvětlit vliv helia na zvýšení citlivosti stanovení fluoru a snížení meze detekce a proč je optimum průtoků tak úzké?
2. V publikaci II je popsána vizualizace částic při měření elektronovou mikroskopií s použitím SW Gwyddion. Rozumím tomu správně, že tento SW provede analýzu obrazu a určí distribuci velikostí částic? Jaká je reprodukovatelnost získané distribuce?
3. V experimentální části publikace II je v kapitole LIBS Instrumentation uvedeno, že systém LEA S500, Solar T II umožňuje nastavení časové prodlevy mezi dvěma pulsy v režimu dvoupulzní techniky LIBS v rozsahu 0 až 20 ms. V kapitole Výsledky a diskuse v témže článku je v podkapitole Optimalizace LIBS uveden tento parametr jako důležitý. Nenalezl jsem však v textu číselnou hodnotu. Byl uvedený laserový systém použit v režimu „single-pulse“, nebo jsem hodnotu intrepulse delay přehlédl? V publikaci II je uvedeno, že „intrepulse delay“ je nastavitelná hodnota v rozmezí 0-20 milisekund, kdežto v publikaci III (a IV) je uveden časový interval od nuly do 20 mikrosekund. Jedná se zřejmě o tiskovou chybu?
4. Nerozumím systému řádků a sloupců v Tabulce I v práci IV.

#### **Závěr**

**Předložená disertační práce Ing. Tomáše Kratochvíla splňuje požadavky kladené na tento typ závěrečné práce, a proto doporučuji, aby po úspěšné obhajobě byl Ing. Kratochvílovi udělen titul Philosophiae Doctor (Ph.D.) ve studijním programu P2837.**

V Brně 1. 11. 2015



Prof. RNDr. Viktor Kanický, DrSc.