

# Luminiscence ve forenzních vědách a kriminalistice

Bc. Pavel Havlík

---

Diplomová práce  
2017



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky  
akademický rok: 2016/2017

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Pavel Havlík**  
Osobní číslo: **A15447**  
Studijní program: **N3902 Inženýrská informatika**  
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Luminescence ve forezních vědách a kriminalistice**  
Téma anglicky: **Luminescence in Forensic Science and Criminology**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši na téma optické metody vzdálené detekce výbušnin.
2. Vyberte optické metody detekce výbušnin, které lze realizovat v laboratořích FAI Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně.
3. Popište složení improvizovaných nástražných systémů a podomácku vyráběných výbušnin a vyberte modelové složení pro analýzu v rámci možností laboratoří FAI Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně.
4. Proveďte analýzu vybraného exploziva, zhodnoťte výhody a nevýhody použité metody.
5. Navrhněte způsoby pokračování studia detekce výbušnin pomocí optických metod.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. KIEFER, Johannes; MATERNY, Arnulf; MOGER, Julian; OFFERHAUS, Herman L; RADI, Peter P; VOLKMER, Andreas; ZHELTIKOV, Aleksei M. Advances in Nonlinear Optical Spectroscopies: A Historical Perspective of Developments and Applications Presented at ECONOS. Journal of Raman Spectroscopy. 2016, vol. 47, no. 9 s. 1111–1123. ISSN:0377-0486.
2. DOTY, Kyle C; MURO, Claire K; BUENO, Justin; HALÁMKOVÁ, Lenka; LEDNEV, Igor K. What Can Raman Spectroscopy Do for Criminalistics?. Journal of Raman Spectroscopy. 2016, vol. 47, no. 1 s. 39–50. ISSN:0377-0486.
3. GARES, Katie L; HUFZIGER, Kyle T; BYKOV, Sergei V; ASHER, Sanford A. Review of Explosive Detection Methodologies and the Emergence of Standoff Deep UV Resonance Raman. Journal of Raman Spectroscopy. 2016, vol. 47, no. 1 s. 124–141. ISSN:0377-0486.
4. CARROLL, Joshua A; IZAKE, Emad L; CLETUS, Biju; JAATINEN, Esa. Eyesafe UV Standoff Raman Spectroscopy for the Ranged Detection of Explosives in the Field. Journal of Raman Spectroscopy. 2015, vol. 46, no. 3 s. 333–338. ISSN:0377-0486.
5. PELANT, Ivan; VALENTA, Jan. Luminescence spectroscopy of semiconductors. 1st pub. New York: Oxford University Press, 2012, 542s. ISBN 978-0-19-958833-6.

Vedoucí diplomové práce:

**doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.**

Ústav elektroniky a měření

Datum zadání diplomové práce:

**3. února 2017**

Termín odevzdání diplomové práce:

**24. května 2017**

Ve Zlíně dne 3. února 2017

doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.  
*děkan*



doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.  
*ředitel ústavu*



#### Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s příjím-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

#### Prohlašuji,

- že jsem na diplomové/bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, dne 22.5.2017

.....  
podpis diplomanta

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá využitím optických metod pro detekci a identifikaci výbušnin a využitím principu luminiscence v této oblasti. Práce je členěna na teoretickou a praktickou část. Teoretická část práce se zabývá v obecném kontextu výbušninami a jejich aplikací v improvizovaných výbušných zařízeních. Dále pak luminiscencí a optickými metodami detekce výbušnin. V praktické části práce jsou měřena luminiscenční spektra vybrané výbušniny s následným hodnocením naměřených výsledků a použité metody. Praktickou část práce uzavírá možný budoucí vývoj výzkumu detekce výbušnin na FAI UTB a shrnutí poznatků o optické detekci výbušnin.

Klíčová slova: Luminiscence, výbušniny, IED, detekce, ANFO, spektroskopie

## **ABSTRACT**

This diploma thesis deals with the use of optical methods for the detection and identification of explosives and the use of luminescence in this field. The thesis is divided into the theoretical and practical part. The theoretical part deals with the general context of explosives and their application in improvised explosive devices. This section also deals with luminescence and optical methods for detecting explosives. In the practical part are measured luminescence spectrums of selected explosive, followed by evaluation of measured results and used method. The practical part of the thesis is concluded by the possible future development of explosive detection research at the FAI UTB and a summary of the findings on optical detection of explosives.

Keywords: Luminescence, Explosives, IED, Detection, ANFO, Spectroscopy

Na tomto místě chci poděkovat panu doc. RNDr. Vojtěchovi Křesálkovi, CSc., vedoucímu této diplomové práce, za jeho odborné vedení, cenné rady a připomínky ke zpracování práce. Děkuji také mé rodině, která mi poskytla zázemí a podporu během celé doby mého studia.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 VÝBUŠNINY</b> .....	<b>11</b>
1.1    DEFINICE VÝBUŠNIN.....	11
1.2    DĚLENÍ VÝBUŠNIN.....	11
1.2.1    Třaskaviny.....	11
1.2.2    Trhaviny.....	12
1.2.3    Střeliviny.....	12
1.2.4    Pyrotechnické slože.....	12
1.2.5    Improvizované výbušniny.....	12
1.3    CHEMICKÁ PODSTATA VÝBUŠNIN.....	13
<b>2 IMPROVIZOVANÉ VÝBUŠNÉ ZAŘÍZENÍ</b> .....	<b>15</b>
2.1    STRUKTURA IMPROVIZOVANÝCH VÝBUŠNÝCH ZAŘÍZENÍ.....	15
2.2    ROZDĚLENÍ IMPROVIZOVANÝCH VÝBUŠNÝCH ZAŘÍZENÍ.....	16
2.2.1    Z hlediska způsobu iniciace.....	16
2.2.2    Z hlediska způsobu dopravy.....	18
2.3    MATERIÁLY POUŽÍVANÉ JAKO VÝBUŠNINY V IMPROVIZOVANÝCH VÝBUŠNÝCH ZAŘÍZENÍCH.....	19
2.4    ÚČINKY IMPROVIZOVANÝCH VÝBUŠNÝCH ZAŘÍZENÍ.....	19
<b>3 LUMINISCENCE</b> .....	<b>21</b>
3.1    DRUHY LUMINISCENCE.....	21
3.2    SPEKTROFLUORIMETRIE.....	22
<b>4 OPTICKÉ METODY DETEKCE VÝBUŠNIN</b> .....	<b>23</b>
4.1    SPEKTROSKOPIE LASEREM BUZENÉHO PLAZMATU.....	23
4.2    RAMANOVA SPEKTROSKOPIE.....	26
4.3    KOHERENTNÍ ANTI-STOKESOVA RAMANOVA SPEKTROSKOPIE.....	29
4.4    UV RAMANOVA SPEKTROSKOPIE.....	30
4.5    MID-IR SPEKTROSKOPIE PULZNÍ LASEROVÉ FRAGMENTACE.....	31
4.6    LASEREM INDUKOVANÁ FLUORESCENCE.....	32
4.6.1    Další metody detekce využívající princip fluorescence.....	33
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>35</b>
<b>5 LUMINISCENČNÍ SPEKTROSKOPIE VYBRANÉ VÝBUŠNINY</b> .....	<b>36</b>
5.1    PŘÍSTROJ PRO MĚŘENÍ LUMINISCENČNÍCH SPEKTER.....	36
5.1.1    Specifikace přístroje.....	36
5.2    VINCI SOFTWARE.....	37
5.3    VYBRANÁ VÝBUŠNINA.....	38
<b>6 MĚŘENÉ VZORKY</b> .....	<b>39</b>
<b>7 NAMĚŘENÁ LUMINISCENČNÍ SPEKTRA</b> .....	<b>40</b>

7.1	DUSIČNAN AMONNÝ .....	40
7.2	SLUNEČNICOVÝ OLEJ .....	41
7.3	MOTOROVÁ NAFTA .....	42
7.4	ANFO .....	43
<b>8</b>	<b>ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A APLIKOVANÉ METODY .....</b>	<b>44</b>
<b>9</b>	<b>POKRAČOVÁNÍ STUDIA OPTICKÝCH METOD DETEKCE VÝBUŠNIN .....</b>	<b>46</b>
9.1	SHRNUTÍ VÝVOJOVÝCH TRENDŮ V OBLASTI DETEKCE VÝBUŠNIN .....	48
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>50</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>52</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>56</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>58</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>59</b>



## ÚVOD

Výbušniny a jejich použití v improvizovaných výbušných zařízeních se staly v posledních desetiletích rostoucí hrozbou pro civilní společnost i vojenské operace. Důvodem je snadná příprava improvizovaných výbušnin a dobrá dostupnost potřebných surovin. Detekce a identifikace výbušnin v reálném prostředí je velmi nebezpečný a náročný úkol. V zájmu ochrany zdraví a životů, civilního obyvatelstva i zasahujících příslušníků bezpečnostních sborů, je zkoumáno a vyvíjeno mnoho metod pro jejich detekci a identifikaci. Tato diplomová práce se zabývá optickými metodami, které by mohly být přínosem zejména ve vzdálené detekci a identifikaci výbušnin.

Cílem této diplomové práce je na začátku teoretické části shrnout obecné informace o výbušninách, jejich vlastnostech, popsat strukturu a principy používaných improvizovaných výbušných zařízení a využití výbušnin v těchto zařízeních. V dalším pokračování teoretické části bude cílem vysvětlit pojem luminiscence, jelikož na základě toho jevu bude následně v praktické části provedena analýza vybrané výbušniny. Teoretickou část pak bude uzavírat podrobný přehled vyvíjených optických metod pro detekci a identifikaci výbušnin.

V praktické části bude, jak bylo výše zmíněno, provedena analýza vybrané výbušniny optickou metodou zakládající se na principu luminiscence. Toto bude následováno vyhodnocením naměřených výsledků a zhodnocením použité metody. Praktickou část bude uzavírat návrh možného dalšího výzkumu detekce a identifikace výbušnin na FAI UTB a shrnutí vývojových trendů v této oblasti.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 VÝBUŠNINY

Tato kapitola se bude věnovat výbušninám. Nejprve jejich obecné definici, dále pak jejich rozdělení do několika skupin, a také základním vlastnostem a procesům, které probíhají při jejich výbušné přeměně.

## 1.1 Definice výbušnin

Pod pojmem „výbušnina“ si můžeme představit chemickou látku, která je schopná velmi rychlé exotermní reakce. Projev exotermní reakce může být ve formě hoření, nebo výbuchu. Tato reakce je také doprovázena uvolněním velkého množství plynných zplodin. [1]

## 1.2 Dělení výbušnin

Skupinu látek, které označujeme jako „výbušniny“ je možné rozdělit dle několika pohledů. Může se jednat o dělení na základě chemického složení, druhu výbušné přeměny, způsobu výroby atd. Následující dělení je nejčastěji používané dělení výbušnin v Česku i na Slovensku. Jde o dělení výbušnin z hlediska jejich použití a jejich typických vlastností. Jedná se o čtyři skupiny, a to:

- třaskaviny,
- trhaviny,
- střeliviny,
- pyrotechnické slože. [1]

Zvláštní kategorii pak tvoří tzv. „*Improvizované výbušniny*.“

### 1.2.1 Třaskaviny

Třaskaviny jsou primárně využívány jako iniciátory trhavin, a to zejména kvůli jejich velmi vysoké citlivosti k vnějším podnětům, jako je úder, plamen, jiskra, nápich, apod. Detonace třaskavin může být způsobena samozřejmě i jinou iniciační výbušninou. Sekundárním využitím třaskavin pak může být také „zcitlivění“ složí. Přestože jsou třaskaviny energeticky chudé, vyznačují se snadným a rychlým přechodem od hoření k detonaci, a i v malém množství jsou schopné iniciovat trhaviny. Nejznámějšími třaskavinami jsou např. třaskavá rtuť, azid olovnatý, azid stříbrný, Tetrazen, nebo Dinol. [1]

### 1.2.2 Trhaviny

Trhaviny jsou v porovnání s třaskavinami rozhodně méně citlivé k vnějším podnětům, avšak ne zcela necitlivé. Iniciovány jsou buď detonací třaskaviny, nebo jiné trhaviny. Disponují vyššími výkonovými parametry než třaskaviny a jejich primárním účelem je tedy prakticky zejména detonace za účelem destrukce materiálu v blízkém okolí. Patří sem aromatické nitrolátky (tritol, kyselina pikrová, tetryl, hexyl), nitroestery (nitroglycerin, nitroglykol, pentrit), cyklické nitraminy (hexogen, oktogen) a jejich vzájemné kombinace, nebo směsi s oksylichovadly (dusičnany, chlorečnany, chloristany). [1]

### 1.2.3 Střeliviny

Jedná se o směs látek, které po iniciaci teplem hoří za vzniku velkého množství plynných zplodin. Častou vlastností střelivin je schopnost hoření i bez přístupu kyslíku. Střeliviny se používají v hlavňových a raketových systémech jako hnací hmoty. Patří mezi ně např. černý prach, nitrocelulosové a nitroglycerinové střelné prachy, výbušné ledky a jim podobné směsi. Střeliviny můžeme rozdělit na:

- střelné prachy,
- pohonné hmoty. [1]

### 1.2.4 Pyrotechnické slože

Jde o směsi oksylichovadel a paliv, jež jsou schopné exotermické reakce se záměrem vyvolání záblesků světla, dýmu, akustických efektů, plamene apod. Citlivost pyrotechnických složí k vnějším podnětům je velmi různá. Některé slože mohou být necitlivé k vnějším podnětům, avšak některé mohou být stejně citlivé jako třaskaviny, např. k mechanickým podnětům. Množství složí je pak citlivé zejména k plamenu a elektrické jiskře. [1]

### 1.2.5 Improvizované výbušniny

Tuto kategorii lze také označit jako „*amatérské*“, nebo „*podomácku vyráběné výbušniny*“. Jde o zvláštní kategorii, kterou tvoří výbušniny, jež mohou být produktem nelegální činnosti, jak osob s kriminálními úmysly, tak amatérských chemiků a nadšenců pro oblast výbušnin.

Vzhledem k dostupnosti informací, zejména z internetu, není v dnešní době problémem v domácích podmínkách vyrobit účinnou výbušninu. Nahrává tomu také možnost

takovou výbušninu vyrobit z vcelku běžně dostupných surovin. Rozmanitost látek a materiálů použitých v oblasti improvizovaných výbušnin může být v případě amatérských výrobců velmi široká. Informace k výrobě čerpají z veřejně dostupných informací, které doplňují odbornou literaturou, což rozšiřuje jejich znalosti na vcelku vysokou úroveň. Přestože mnoho těchto amatérských výrobců nevyrábí výbušniny ke kriminálnímu využití, ale ze zvědavosti a zájmu o tuto oblast, sdílené zkušenosti, postup výroby a vlastnosti takových látek, pak mohou být na internetu zdrojem informací pro osoby s úmyslem páchaní trestné činnosti za použití výbušniny. Nejčastější skupina, která výbušniny vyrábí pro kriminální účely, jsou samozřejmě teroristé a teroristické organizace. Předmětem výroby jsou zejména výbušniny se snadnou dostupností potřebných surovin a snadným postupem výroby.

*„Typy výbušnin, které jsou nejčastěji připravovány v improvizovaných podmínkách, se z velké části překrývají s výbušninami, které jsou vyráběny průmyslově (např. hexogen, nitroglycerin, nitroglykol, trhavinu typu DAP, zábleskové slože). Dále jsou připravovány výbušniny, které vzhledem k nevyhovujícím vlastnostem nikdy nenalezly průmyslové využití (např. dusičnan močoviny, methylnitrát, TATP, HMTD), nebo byly nahrazeny výbušninami vhodnějšími (např. chlorečnanové trhaviny).“ [1]*

Vzhledem k improvizovaným podmínkám přípravy a leckdy nedokonalému postupu výroby je riziko výbuchu velmi podstatným aspektem při výrobě improvizovaných výbušnin. Příčinou však mohou být i špatné skladovací podmínky, či neopatrná manipulace. Dalším rizikem je uvolňování toxických plynů, které mohou vznikat při chemických reakcích v procesu výroby. U podomácku vyráběných výbušnin je třeba také počítat s potenciální nestabilitou a citlivostí na vnější podněty, jelikož v průmyslové výrobě je nutnou součástí výrobního procesu zajištění stabilizace výsledného produktu, zatímco v improvizovaných podmínkách je tento fakt často opomíjen. *„Mezi zvláště rizikové improvizované výbušniny patří všechny nitroestery (především pak nitrocelulóza, kterou v amatérských podmínkách nikdy nelze dostatečně stabilizovat) a triaceton triperoxid.“ [1]*

### 1.3 Chemická podstata výbušnin

Na základě chemického složení můžeme výbušniny rozdělit do dvou kategorií, a to:

1. *výbušniny, které obsahují alespoň jednu skupinu dusitanu ( $\text{NO}_2^-$ ), nebo dusičnanu ( $\text{NO}_3^-$ )*
2. *výbušniny, které neobsahují dusitan, ani dusičnan [2]*



Do první kategorie patří např. TNT (trinitrotoluen), RDX (cyklotrimethylentri-nitramin), nebo PETN (Pentaerythritol tetranitrát). Obsahují nejen dusík, ale také vodík, uhlík a kyslík. Obecná vlastnost těchto materiálů je, že obsah dusíku a kyslíku v jejich molekulách výrazně převyšuje obsah uhlíku a vodíku. Relativní obsah dusíku je několikanásobně vyšší než u běžných materiálů (např. hedvábí, nebo nylonu). Tato skupina výbušnin je nejrozšířenější. [2]

Druhou skupinu tvoří výbušniny vycházející z peroxidů, např. TATP (triaceton triperoxid), chloristany a azidy. [2]

## 2 IMPROVIZOVANÉ VÝBUŠNÉ ZAŘÍZENÍ

„Improvizované výbušné zařízení“ (IED – Improvised Explosive Device) je termín užívaný pro podomácku vyráběné destruktivní zařízení za účelem ničení materiálu, zneschopnění a usmrcení osob, provádění rušivé činnosti, nebo k odvedení pozornosti. Útoky za využití IED jsou častým nástrojem především pro teroristy, sebevražedné atentátníky, povstalce, ale také obyčejné kriminálníky a vandaly. Vzhledem k „domácí“ improvizované výrobě těchto zařízení je možno se setkat s velmi různorodými formami sestavení IED, od malých trubkových bomb až po sofistikovanější zařízení disponující obrovským ničivým účinkem a schopností způsobit velké ztráty na životech. IED bývá umístěno tak, aby nebylo zpozorováno před samotnou iniciací, případně je ukryto v obalu, který má skrýt pravý účel předmětu. Mezinárodně užívaný termín „IED“ vešel v běžné užívání v roce 2003 během války v Iráku. [3]

V českém prostředí je možné se setkat jak s označením IED, tak také s pojmem „Nástražný výbušný systém“ (NVS), který je použit a definován např. v metodickém listu „Zásah při výskytu výbušných látek a výbušných předmětů před jejich iniciací“ zpracovaného Generálním ředitelstvím Hasičského záchranného sboru České republiky. Definice NVS je v tomto dokumentu následující:

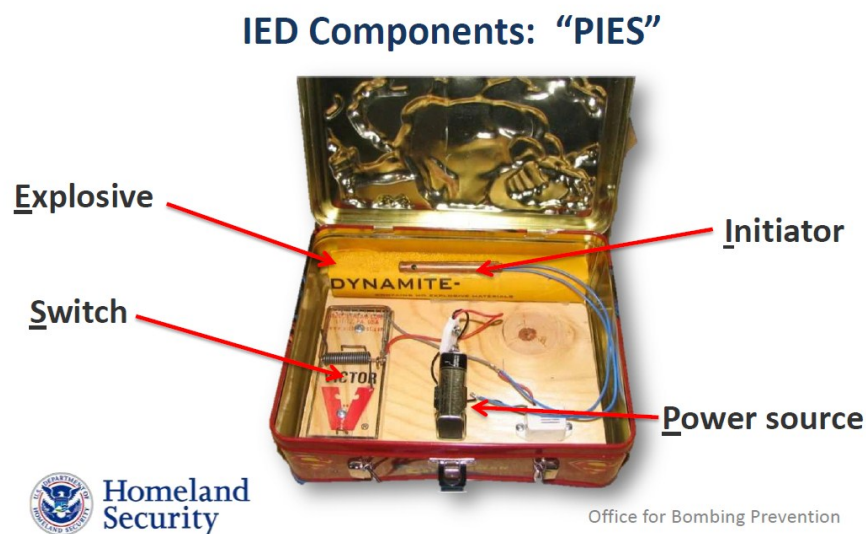
*„Výbušný systém (VS) se skládá z výbušniny a iniciačního zařízení. Dalšími součástmi může být obal, zdroj elektrické energie, součásti pro posílení fragmentačního účinku nebo tepelné radiace apod. NVS je takový VS, který je skryt nebo kamuflován jako předmět jiného typu, příp. je spojen s jiným předmětem, a je iniciován při pokusu o jeho odstranění resp. o manipulaci s ním, příp. při pokusu o manipulaci s předmětem, se kterým je spojený, nebo je iniciován na dálku, resp. časovacím zařízením.“ [4]*

### 2.1 Struktura improvizovaných výbušných zařízení

IED jsou obecně navrhovány tak, aby byly účinné na určitý typ cíle. Jejich konstrukční rafinovanost se zvyšuje, takže se stávají stále obtížnějšími k detekci. Klíčovými aspekty sofistikovanosti zařízení jsou vynalézavost a zkušenosti návrháře, a také dostupnost materiálů a nástrojů. IED se skládá z několika typických komponent, obvykle to jsou:

- Spínač – na základě vnějšího podnětu spíná obvod mezi zdrojem energie a iniciátorem.

- Iniciátor – obvykle třaskavina, je odpálen v první fázi výbuchu a vytváří tak podnět k explozi hlavní nálože.
- Hlavní nálož – obvykle trhavina, jde o hlavní destruktivní složku zařízení.
- Napájecí zdroj – slouží k aktivaci iniciátoru.
- Kontejner – tvoří obal IED, jeho účelem může být skrytí pravého účelu zařízení, nebo také zesílení ničivých účinků. [3]



Obr. 1 Struktura IED [5]

IED mohou být obklopeny, nebo zabaleny materiály, jako jsou hřebíky, sklo, nebo kovové úlomky. Tyto materiály slouží ke zvýšení množství šrapnelů uvolněných výbuchem, což zvyšuje destruktivní sílu výbuchu a ohrožuje zejména osoby. Tyto materiály mohou zahrnovat i další prvky, jako jsou např. nebezpečné chemické látky. IED může být iniciováno různými způsoby v závislosti na zamýšleném cíli. [5]

## 2.2 Rozdělení improvizovaných výbušných zařízení

Rozdělení IED lze učinit z mnoha různých pohledů. V následujících podkapitolách jsou zmíněny dva pohledy, a to z hlediska způsobu iniciace a dopravy k cíli.

### 2.2.1 Z hlediska způsobu iniciace

IED lze iniciovat širokou škálou různých metod. Iniciační metoda často závisí na zamýšleném cíli. Stejně jako u všech aspektů návrhu IED, metody iniciace se neustále vyvíjejí a jsou omezeny pouze vynalézavostí výrobce zařízení. Mezi nejčastější metody iniciace patří iniciace:

1. časová iniciace,
2. časová iniciace,
3. iniciace obětí.

Časová iniciace umožňuje útočnickovi nastavit detonaci IED v určitou dobu. To umožňuje útočnickovy minimalizovat šanci odhalení a zvýšit šanci úniku. [6]

Iniciace založená na příkazu může být realizována pomocí pevného drátu, nebo bezdrátovými prostředky, umožňuje útočnickovi určit přesný okamžik výbuchu a je velmi běžnou formou útoku v Iráku a Afghánistánu. Iniciace příkazem je často používána proti pohyblivým cílům, které vytvořily určitou formu rutinního pohybu. [6]

Iniciace obětí, jak naznačuje název, je metoda, kdy je IED aktivováno podnětem způsobeným zamýšleným cílem. Tyto IED zahrnují širokou škálu iniciačních zařízení, včetně tlakových a tlakově uvolňovaných spínačů, tažných drátů a technologií detekce pohybu. [6]

Initiation mode	Initiation system	Remarks
Timed	Chemical decay	
	Clockwork	
	Electronic timer	
Command-initiated	Suicide	PBIED Can also be timed
	Radio-controlled (RCIED)	
	Command wire (CWIED)	
	Passive infrared	
	Active infrared	
	Projectile-controlled (PCIED)	Uses a rifle bullet to connect a circuit from a distance
Victim-operated (VOIED)	Booby traps	
	Pressure pads	
	Pull switches	

Obr. 2 Způsoby iniciace IED [7]

### 2.2.2 Z hlediska způsobu dopravy

Útočníci při dopravě IED k cíli využívají opět velké množství metod.

Pasivní, nebo skryté statické zařízení jsou nejčastějším typem způsobu „dopravy“ IED k cíli, jde tedy spíše o přiblížení se cíle k IED, v případě osob a vozidel. IED však mohou být také umístěna k budovám, nebo umístěna na cílové vozidlo. [6]

IED, které je přepravované vozidlem mohou disponovat opravdu velkými destrukčními účinky vzhledem k možnosti do vozidla umístit velký objem výbušnin. Mohou být odpáleny dálkovým ovládním, nebo i řidičem vozidla. Cílem mohou být osoby i infrastruktura. Kromě vyššího destrukčního potenciálu vyplývajícího z velikosti nálože disponují tyto IED také účinky způsobenými velkým množstvím šrapnelů uvolněných do okolí po detonaci vozidla. Za sekundární účinek pak může být považováno vznícení paliva a zapálení okolí výbuchu. [6]

Osobní IED, přepravované sebevražedným útočníkem, jsou primárně konstruovány k útoku na osoby civilního i vojenského charakteru. Mohou být konstruované jako vesta, opasek/pás, nebo jako speciálně upravený oděvu pro uložení výbušného materiálu. [6]

Posledním metodou dopravy k cíli může být využití „metaných/vrhaných“ IED, případně IED disponující nějakým druhem raketového systému. Tyto metody nejsou však příliš běžné.

Type of delivery	Target	Remarks
Vehicle-borne	Personnel/infrastructure	LVBIED* VBIED**
Person-borne	Personnel	PBIED***
Passive	Personnel/vehicles	Land mine types
Directional	Vehicles/infrastructure	Projected devices, missiles, and rockets
Placed	Personnel/vehicles/infrastructure	

\* Large vehicle-borne IED.

\*\* Vehicle-borne IED.

\*\*\* Person-borne IED.

Obr. 3 Způsoby dopravy IED k cíli [7]



### 2.3 Materiály používané jako výbušniny v improvizovaných výbušných zařízeních

Mnoho běžně dostupných materiálů, jako jsou hnojiva, střelný prach a peroxid vodíku, lze použít jako výbušné materiály v IED. Výbušniny musí obsahovat palivo a oxidant, který poskytuje kyslík potřebný k udržení reakce. Typickým příkladem je ANFO (Ammonium nitrate/fuel oil), směs  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  (dusičnan amonný), který působí jako oxidační činidlo a palivo, např. nafta. Obavy z používání výbušnin vytvořených z kapalných složek, které mohou být přepravovány ve stabilní formě a smíchány v místě útoku, jsou důvodem omezení množství tekutin, které mohou cestující přepravovat v komerčních letech. [3]

Na druhou stranu, v IED nejsou používány pouze improvizované výbušniny, ale také vojenská konvenční munice. Příkladem může být válka v Iráku, ale nezajištěné zásoby konvenční munice a výbušnin představují riziko pro každý stát, který zažívá povstání, nebo občanskou válku. Irák není jedinečný případ, ale je příkladem toho, že přístup k zásobám střeliva v post-konfliktním prostředí může poskytnout účinný materiál pro výrobu IEDs povstaleckým a teroristickým skupinám i po ukončení konfliktu v zemi. Problematika zabezpečení těchto zásob zdůrazňuje potřebu účinné ochrany a rychlého zajištění konvenční vojenské munice, která je během konfliktu ponechána volně k rabování. Statistiky IED útoků v Iráku jsou důkazem nebezpečí, které může nastat, když mezinárodní síly nepodniknou nezbytná opatření k zajištění této munice. [7]

### 2.4 Účinky improvizovaných výbušných zařízení

Explozivní účinky IED jsou:

- tlaková vlna,
- střepinový účinek,
- tepelný účinek,
- zvukový efekt,
- seismický účinek,
- uvolnění toxických plynů.

Rozsah škody způsobené IED závisí na velikosti, konstrukci, umístění a druhu použité výbušniny. Na volném prostranství lze vycházet z následujících hodnot bezpečné vzdálenosti v závislosti na hmotnosti nálože, tyto hodnoty jsou součástí metodického listu

„Zásah při výskytu výbušných látek a výbušných předmětů před jejich iniciací“ zpracovaného Generálním ředitelstvím Hasičského záchranného sboru České republiky.

Tab. 1 Bezpečná vzdálenost v závislosti na hmotnosti nálože [4]

Hmotnost nálože	Minimální bezpečná vzdálenost na volném prostranství	Minimální bezpečná vzdálenost při dobrém krytí na volném prostranství
do 1 kg	150 m	50 m
1kg - 5 kg	150 m – 200 m	100 m
5kg - 10 kg	200 m – 300 m	150 m
10 kg - 25 kg	300 m – 450 m	150 m
25kg - 50 kg	450 m – 600 m	200 m
50 kg - 500 kg	600 m – 700 m	300 m
500 kg - 1000 kg	700 m – 1000 m	400 m – 600 m
1000 kg - 10 000 kg	1000 m – 2000 m	600 m – 1800 m
nad 10 000 kg	2000 m	2000 m

### 3 LUMINISCENCE

Pojem „luminiscence“ odvozený z latinského „*lumen*“, což znamená světlo, byl poprvé použit v roce 1888 německým fyzikem Eilhardem Wiedemannem. „*Luminiscence je nerovnovážné záření, vysílané tělesem navíc oproti rovnovážnému záření popsanému Planckovým zákonem.*“ [8]

K tomu, aby daná látka luminiskovala je potřeba jí dodat potřebné množství energie, kterou absorbuje, tato činnost se nazývá „*buzením*“, nebo také „*excitací*“ luminiscence. Následná přebytečná energie se uvolňuje ve formě fotonů. Emise světla nastává z elektronových excitovaných stavů. Délka trvání luminiscence se může pohybovat v rozmezí  $10^{-15}$  sekund až po hodiny, nebo také dny. V souvislosti s délkou trvání luminiscence se objevují dva termíny, a to:

- **Fluorescence** – jedná se o druh luminiscence, která vymizí téměř okamžitě po skončení excitace, tj. jednotky až desítky femtosekund ( $10^{-15}$ ).
- **Fosforence** – jde o déle trvající, časově neomezené vyrchávání luminiscence po skončení excitace.

Přestože luminiscenci vykazuje většina organických látek, není luminiscence vlastní všem látkám. Existuje několik způsobů excitace, podle nichž rozeznáváme různé druhy luminiscence. [8]

#### 3.1 Druhy luminiscence

- **FOTOLuminiscence** – buzení spočívá v ozáření tělesa světlem, při tomto druhu luminiscence platí Stokesův zákon, tj. „*vlnová délka luminiscence je vždy delší než vlnová délka buzení*“.
- **ELEKTROLuminiscence** – buzení spočívá v aplikaci elektrického napětí a průchodu elektrického proudu látkou.
- **CHEMILuminiscence** – nevyžaduje buzení, je doprovodným jevem exotermních chemických reakcí, při kterých vyzařuje přebytečnou energii ve formě světelného záření.
- **BIOLuminiscence** – je doprovodným jevem exotermních chemických reakcí v živých organismech.
- **KATODOLuminiscence** – buzení spočívá v dopadu urychlených elektronů pohybujících se v prostředí vakua, nebo silně zředěného plynu.

- **RENTGENOLuminiscence** – buzení spočívá v ozáření látky rentgenovými paprsky.
- **RADIOluminiscence** – buzení spočívá ve vystavení látky ionizujícímu záření.
- **TERMOLuminiscence** – buzení spočívá v ochlazení látky, vystavení viditelnému nebo ultrafialovému záření a následnému zahřání látky.
- **MECHANOLuminiscence** – buzení spočívá v mechanickém působení na pevnou látku.
- **TRIBONOLuminiscence** – buzením je tření dvou těles.
- **KRYSTALOLuminiscence** – buzení spočívá v krystalizaci roztoku.
- **SONOLuminiscence** – vzniká v důsledku šíření intenzivní zvukové vlny v látce. [8]

### 3.2 Spektrofluorimetrie

Přístroje pro měření fluorescence můžeme rozdělit do čtyř kategorií:

1. **spektrofluorimetry** – „měří střední signál celého vzorku umístěného obvykle v kyvetě, nebo v jamce mikrodestičky“,
2. **fluorescenční mikroskopy** – „umožňují pozorovat fluorescenci dvoj- nebo trojrozměrných mikroskopických objektů“,
3. **fluorescenční skenery** – „měří fluorescenci dvojrozměrných makroskopických objektů (elektroforetické gely, bloty, chromatogramy)“,
4. **průtokové cytometry** – „měří fluorescenci velkého množství jednotlivých buněk a umožňují identifikaci a separaci jejich subpopulací“. [9]

**Spektrofluorimetrie** – Pro měření ustálené fluorescence využívají excitaci vzorků pomocí vysokotlaké výbojky, pro časově rozlišenou fluorescenci využívají obvykle pulzní lasery. Excitační záření se nachází v ultrafialové a viditelné oblasti spektra, je vyzařováno excitačním monochromátorem a dopadá na zkoumaný vzorek. Emitované fluorescenční záření ze vzorku se nejčastěji měří kolmo k dopadajícímu excitačnímu paprsku. Detekováno je fotonásobičem po průchodu emisním monochromátorem. Využívány jsou dvě konstrukce:

- Konstrukce typu „L“ – využívá jeden emisní monochromátor,
- Konstrukce typu „T“ – využívá dva protilehlé emisní monochromátory.

Při měření polarizované fluorescence jsou za excitační monochromátor a před emisním monochromátorem zařazeny polarizátory, které jsou otočné kolem osy paprsku jimi procházejícího. [9]

## 4 OPTICKÉ METODY DETEKCE VÝBUŠNIN

Během posledních dvou desetiletí se terorismus vyvinul do pozice jedné z nejvážnějších hrozeb pro bezpečnost kteréhokoliv státu. Mnoho z těchto teroristických útoků se uskutečňuje za použití výbušnin. Většinou se jedná o důmyslně skrytá nebo maskovaná zařízení. Takovéto typy bomb jsou známé jako improvizovaná výbušná zařízení. Metody mnohdy používané k jejich odhalení a identifikaci vyžadují přiblížení se k podezřelému objektu za účelem provedení analýzy, znamenající riziko pro operátora. Proto je rozvíjena snaha vyvíjet nové techniky a metody pro identifikaci cílového objektu, za podmínek přijatelné úrovně spolehlivosti a udržování bezpečné vzdálenosti pro obsluhu. Bezpečná zóna se liší podle scénáře a typu IED, může se pohybovat od desítek metrů v případě sebevražedného atentátníka až po stovky metrů v případě bomby umístěné ve vozidle. Detekce a identifikace výbušných materiálů za těchto podmínek je jedním z nejnáročnějších úkolů pro výzkumníky. Detekce na velké vzdálenosti zahrnuje fyzické obtíže, které mohou vést k významnému kompromisu v citlivosti použitých metod. [10]

### 4.1 Spektroskopie laserem buzeného plazmatu

Spektroskopie laserem buzeného plazmatu, anglicky nazývaná „*Laser-induced breakdown spectroscopy*“ (LIBS), nebo také „*Laser-induced plasma spectroscopy*“ (LIPS) je analytická metoda, která využívá působení vysokoenergetického laseru na látku.

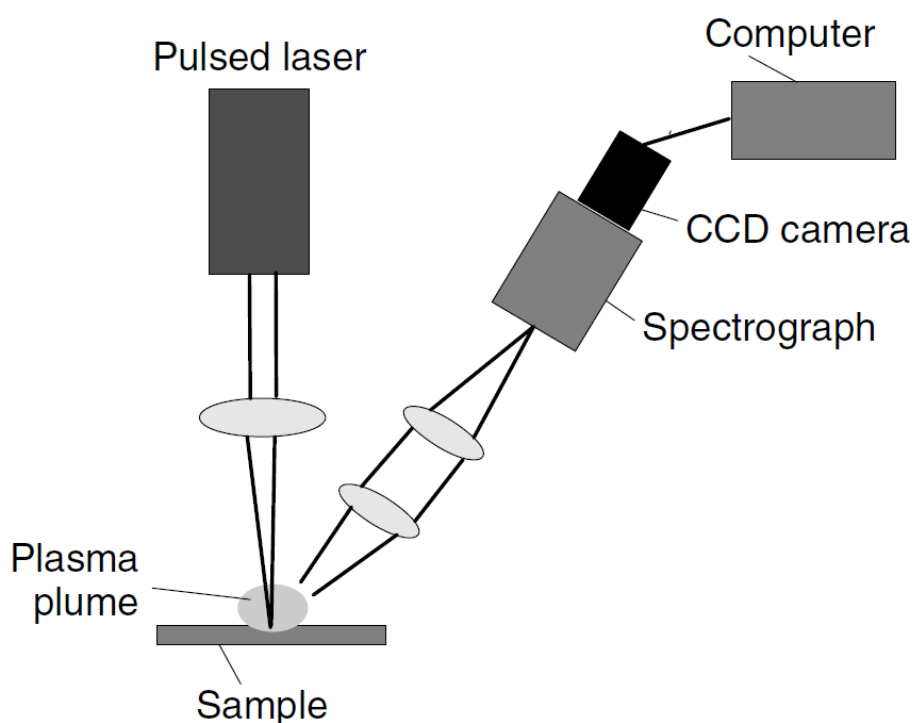
Pro účely této analýzy se používá vysokoenergetický pulzní laser, s délkou trvání pulsu v jednotkách nanosekund, soustředěný do bodu o velikosti menší než 1mm v průměru, což vede k odpaření (ablace) velmi malého množství materiálu (v řádu nanogramů) z povrchu látky a vzniku plazmatického útvaru, jehož analýza slouží k určení chemického složení vzorku. [2, 11]

Pro zachycení kvalitního signálu je nutné využít správné časové okno, aby byl eliminován efekt „*kontinuální brzděného záření*“, který je důsledkem interakce mezi ionty, a také mezi elektrony a ionty. V důsledku tohoto jevu se využívá časové okno několika mikrosekund po skončení ozařování vzorku, kdy se začne plazma výrazněji ochlazovat, a je tak možné zachytit spektrální čáry dostatečné intenzity. Zachycené záření je soustředěno do optického vlákna vedoucího do spektrometru. Ve spektrometru je světlo soustavou zrcadel, hranolů a difrakčních mřížek rozloženo podle vlnových délek a zpracováno ICCD



(Intensified charge-coupled device) čipem. Signál ve tvaru závislosti intenzity světla na vlnové délce je následně zpracováván na PC. [2, 11, 12]

Působením laseru na povrch vzorku dochází k ablací částic, které vytváří plazmový útvar. Záření plazmatického útvaru (oblaku) obsahuje informace o prvkovém složení materiálu, protože atomy a ionty vytvářejí charakteristickou množinu emisních čar pro každý prvek. Na základě signálu zachyceného spektrometrem je možné určit nejen prvkové složení zkoumaného materiálu, ale s pomocí speciálních algoritmů je také možné zkoumaný materiál jednoznačně identifikovat. [2, 11, 12]



Obr. 4 Schématické znázornění LIBS [11]

Tento plazmový oblak se skládá z více menších molekulárních, iontových a atomových druhů, které vyzařují fotony o určitých vlnových délkách. Poměry naměřené intenzity emisních čar uhlíku, dusíku, kyslíku a vodíku, v porovnání se spektry známých sloučenin, mohou být použity k vyvození molekulární struktury vzorku. Jak bylo uvedeno výše v podkapitole **1.3 Chemická podstata výbušnin**, společnou vlastností výbušnin je, že obsah molekul dusíku a kyslíku v nich výrazně přesahuje obsah uhlíku a vodíku. Stanovením množství dusíku a kyslíku ve vzorku vzhledem k ostatním prvkům, je možno zjistit, zda daná chemická sloučenina vykazuje chemické vlastnosti charakteristické pro výbušninu. [2, 13]

V uplynulém desetiletí bylo zkonstruováno několik nástrojů LIBS pro detekci výbušnin. V práci Lopez-Moreno a kol.<sup>1</sup> byl demonstrován převozný LIBS velikosti vozíku, disponující pulzním laserem Nd:YAG s energií laserového pulzu 350mJ o vlnové délce 1064nm, který detekoval TNT, RDX a C-4 umístěné na dveřích automobilu ve vzdálenosti 30m, viz obrázek č. 5. Při měřeních v terénu je v současnosti snahou schopnost identifikovat spektrální charakteristiku výbušniny i za přítomnosti jiných emitujících interferencí. [13]



Obr. 5 Vozíkový LIBS pro vzdálenou detekci výbušnin [13]

Vývojové studie Gonzáleze a kol.<sup>2</sup> ukazují, že detekce výbušnin je možná i přes bariéru mezi zkoumaným vzorkem a snímačem LIBS. Testovány byly překážky z polymethylmethakrylátu (PMMA) a různých druhů skla. Prezentovány byly výsledky detekce např. DNT (dinitrotoluen), TNT, nebo C4 až na vzdálenost 30m. Tyto aplikace LIBS otvírají širokou perspektivu zejména pro detekci výbušnin skrze okna vozidel a budov. [13]

Využití LIBS pro detekci výbušnin je možno také zaznamenat ve studiích Morose a kol.<sup>3</sup>, kteří vyvinuli zařízení, které kombinuje LIBS a Ramanovu spektrometrii za účelem

---

<sup>1</sup> C. Lopez-Moreno, S. Palanco, J. J. Laserna, F.C. DeLucia, A. W. Miziolek, J. Rose, R. A. Walters, A. I. Whitehouse, *J. Anal. At. Spectrom.* 2006, 21, 1.

<sup>2</sup> R. González, P. Lucena, L. Tobaría, J. Laserna, *J. Anal. At. Spectrom.* 2009, 24, 8.

<sup>3</sup> J. Moros, J. Lorenzo, J. Laserna, *Anal. Bioanal. Chem.* 2011, 400, 10.

měření prvkových a molekulárního informací. Metoda využívá jediný laserový impuls o vlnové délce 532nm pro vytvoření LIBS plazmatu i Ramana rozptylu. Signály jsou shromažďovány pomocí teleskopu a každý zvlášť směřován do separátního spektrometru k získání souběžných výsledků. V této studii byly měřeny na vzdálenost 20m vzorky  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , RDX, DNT, TNT, PETN,  $\text{KClO}_3$  (chlorečnan draselný) a  $\text{NaClO}_3$  (chlorečnan sodný). [13, 15]

Výhody ve zkoumání a rozvoji metody LIBS pro vzdálenou detekci výbušnin spočívají v:

- poměrně snadné realizaci zařízení,
- relativně vysoké citlivosti v porovnání s ostatními metodami,
- nepotřebnosti přípravy měřených vzorků,
- relativní nedestruktivnosti vzorku,
- možnosti analýzy jakéhokoliv skupenství
- možnosti měření na vzdálenost až několika desítek metrů,
- realizaci přenosných zařízení,
- rozvoj fs-LIBS (*femtosecond laser-induced breakdown spectrometry*), využívající femtosekundové impulzy poskytující větší rychlost skenování vzorku, minimalizaci ovlivnění rušivými elementy a větší citlivost. [2, 13]

Negativními aspekty LIBS jsou zejména:

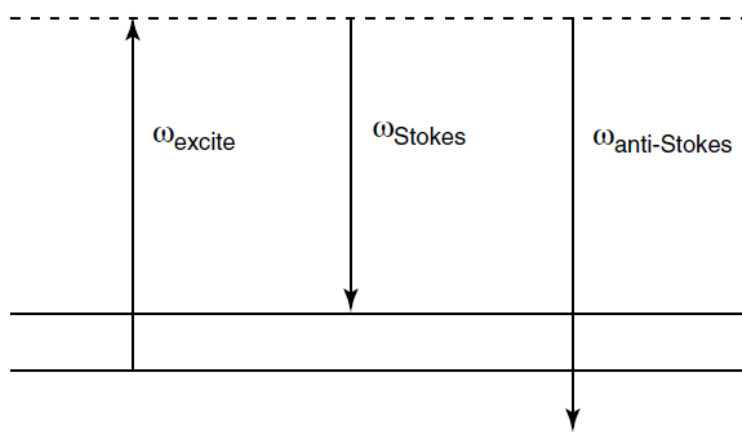
- vliv vzduchu, jehož hlavní složky dusík, kyslík a vodík (z vody ve vlhkých dnech) přispívají k ovlivňování spektra (využívá se dvoj-pulzního LIBS k eliminaci odchylek),
- nemožnost využití při zkoumání osob,
- nebezpečnost pro zrak v důsledku použití vysokoenergetického pulzního laseru,
- nutnost použití speciálních algoritmů pro detekci výbušnin ve více složkových směsích na základě určení jejich elementárního složení. [2, 13]

## 4.2 Ramanova spektroskopie

Ramanova spektroskopie patří mezi velmi využívané metody vzdálené detekce výbušnin. Zkoumá molekulární spektra, které jsou vyvolány vibračně - rotačními přechody. Vzhledem k tomu, že tyto přechody jsou specifické pro každou molekulární strukturu, je Ramanovo spektrum neelasticky rozptýleného záření pro každou chemickou sloučeninu

specifické a může tak sloužit k její identifikaci. Ramanovo spektrum vzniká modulací indukovaného dipólového momentu molekuly v důsledku vibrací jader atomů, které vnikají do této molekuly při ozařování monochromatickým UV, nebo viditelným světlem. Ramanova spektra podrobně popisují intenzitu nerovnoměrně rozptýleného světla, jako funkci frekvenčního rozdílu ve vztahu k budícímu světlu. [2, 13]

Ramanův signál je výsledkem nepružné kolize mezi fotonem a molekulou. Ramanův přechod je oddělen od excitační vlnové délky v důsledku energetického rozdílu, který odpovídá vibračnímu rozdílu energie molekuly v jejím základním stavu. Přechody, které mají nižší energii než excitační laser, jsou známy jako Stokesovy přechody a ty, které mají vyšší energii, se nazývají anti-Stokesovy přechody, viz obrázek č. 6. V Ramanově spektru se mohou vyskytnout oba typy těchto přechodů současně. K analytickým účelům se obecně více využívají Stokesovy přechody, jelikož jejich intenzita je mnohem silnější, nežli je intenzita anti-Stokesových přechodů. [11, 14]



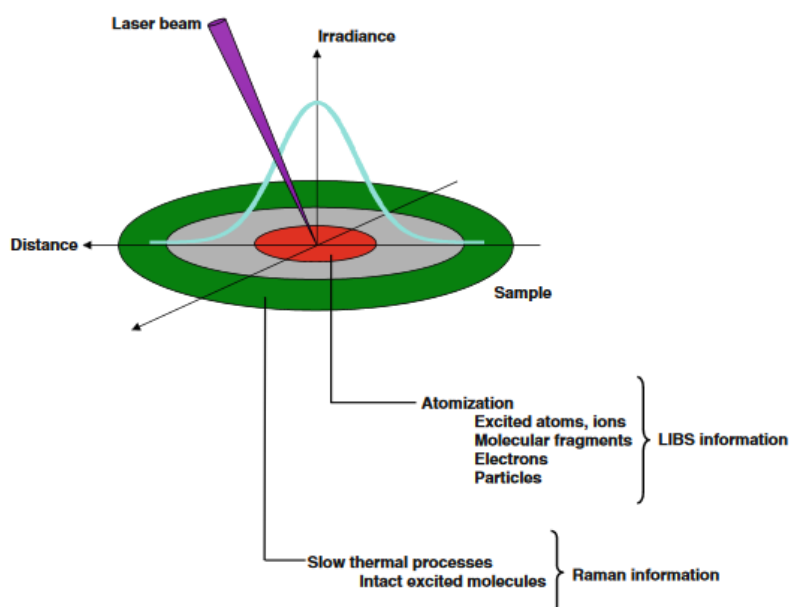
Obr. 6 Schéma Ramanova rozptylu [11]

Ramanova spektroskopie disponuje dobrým potenciálem ke vzdálené detekci výbušnin, avšak vlnové délky potřebné pro odpovídající generování signálu jsou často mnohem větší než to, co je pro lidské oko, nebo kůži bezpečné, což omezuje použití této metody. Ramanovo spektrum je množina dat ve dvojrozměrné matici datových bodů skládající se z posunu Ramanova vrcholu a intenzity. [15, 16]

Ramanova spektroskopie je v současnosti využívána ve forezních vědách k analýzám a identifikaci výbušnin, ale i drog. Metoda je neustále rozvíjena v laboratorních podmínkách a vykazuje nadějně výsledky pro aplikaci do dalších forezních odvětví. Zkoumání metody směřuje především k vývoji přenosných zařízení se statistickým softwarem a vývoji spektrálních databází. Předtím, než bude Ramanova spektros-

kopie považována za ověřenou forenzní techniku a implementována do forenzních protokolů, je potřeba ji ještě důkladně rozvinout. Nicméně Ramanova spektroskopie je příslibem ideální forenzní metody, což souvisí s univerzálním použitím pro mnoho forem důkazů, nedestruktivní povahou, bezkontaktností, přenositelností a schopností poskytnout odpovídající přesnost a odhadnutí chyby spojené se všemi výsledky získanými pomocí chemometrie. [13, 14, 17]

Jak už bylo zmíněno v minulé kapitole, Ramanova spektroskopie je často využívána v kombinaci s metodou LIBS, protože obě využívají podobnou instrumentaci a současně se datovým výstupem vhodně doplňují.



Obr. 7 Princip excitace Raman-LIBS spekter [15]

Obě dvě tyto metody zkoumají vzorek laserovým paprskem o vysoké intenzitě. Jelikož jsou spektra rozptylu (Raman) a atomová emisní spektra (LIBS) relativně nezávislá na pracovní vlnové délce laseru, může být v obou případech použit jediný excitační zdroj. Navíc vzhledem k tomu, že Ramanova spektrografie a LIBS vyžadují přibližně stejné spektrální rozlišení, je možné použít spektrografie srovnatelného výkonu. Přestože většina Ramanových spekter je získávána za použití laseru s konstantními vlnami, excitace impulsními lasery se stává stále oblíbenější díky široké dostupnosti, stejně jako stabilitě a spolehlivosti těchto systémů. Vzhledem k tomu, že metoda LIBS využívá vždy impulsních laserů, detekční schéma založené na multikanálových detektorech nabízí řešení pro získávání spektrálních dat obou metod. [14, 15]

Kombinace těchto metod nabízí větší potenciál při detekci a identifikaci výbušnin a jejich rozlišování od neškodných sloučenin. Ramanova spektroskopie poskytuje informace o molekulárním složení vzorku na základě jeho vibračního spektra a LIBS poskytuje podrobné informace o prvkovém složení. Tyto výhody a příležitosti jsou důvody, které vyvolaly zájem o vývoj nástrojů, které mohou integrovat obě technologie. [14, 15]

### 4.3 Koherentní anti-Stokesova Ramanova spektroskopie

Koherentní anti-Stokesova Ramanova spektroskopie (coherent anti-Stokes Raman spectroscopy), zkráceně CARS, je nelineární metodou, která využívá k excitaci vzorku dva laserové paprsky. Patří mezi zkoumané metody pro vzdálenou detekci výbušnin.

V metodě CARS se využívá měření záření v anti-Stokesově oblasti, protože použitím klasické rezonanční Ramanovy spektroskopie dochází k rušení fluorescenčním zářením. Ramanův rozptyl se získává nelineární konverzí dvou laserových paprsků do jednoho, z něhož je vytvořen paprsek vysoké intenzity v oblasti Anti-Stokesova rozptylu, což snižuje interference fluorescenčního záření. Využívá se dvou laserových frekvencí – „pump“ frekvence ( $\omega_1$ ) a laditelná frekvence ( $\omega_2$ ), které jsou zkombinovány a zaměřeny na vzorek, čímž vzniká třetí koherentní frekvence ( $\omega_3$ ), kde  $\omega_3 = 2\omega_1 - \omega_2$ . Když se  $\omega_1 - \omega_2$  rovná frekvenci Ramanova přechodu v molekule, zvyšuje se intenzita signálu CARS. Výsledkem je, že CARS spektrum může být vytvořeno skenováním  $\omega_2$  a zaznamenáním výsledné intenzity CARS. [2, 13,18]

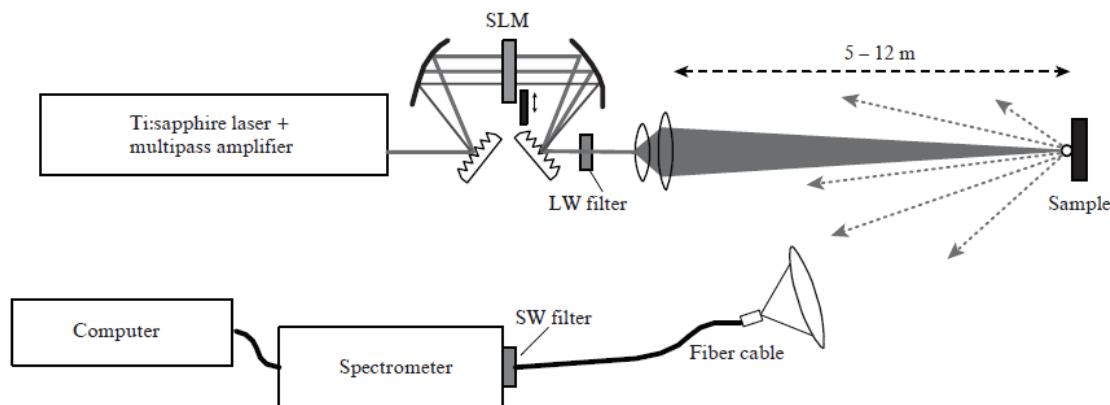
Předmětem zkoumání je také CARS využívající ultrarychlé femtosekundové lasery, kdy je využíván jediný širokospektrální paprsek. Bremer a kol.<sup>4</sup> sestavil tzv. jednopaprskový CARS zobrazovací spektrometr, který byl použit k měření multispektrálních obrazů DNT v koncentracích  $\mu\text{g} / \text{cm}^2$  na vzdálenost 1m. Natan a kol.<sup>5</sup> pak vyvinul jednopaprskový CARS spektrometr, který by mohl měřit vzorky, jako jsou dusičnany, močovina a RDX, ve vzdálenosti od 12 m do 50 m za použití čočky o průměru 19 cm. Autoři prokázali, že RDX může být detekováno na vzdálenost 24 metrů během 3 sekund. Nicméně vývoj zařízení využívajících metodu CARS pro použití v terénu je obtížný kvůli poměrně

---

<sup>4</sup> M. T. Bremer, P. J. Wrzesinski, N. Butcher, V. V. Lozovoy, M. Dantus, Appl. Phys. Lett. 2011, 99, 10.

<sup>5</sup> A. Natan, J. M. Levitt, L. Graham, O. Katz, Y. Silberberg, Appl. Phys. Lett. 2012, 100, 5.

vysokým nákladům na laser, a také kvůli bezpečnostním rizikům, která souvisejí s ultrarychlými excitačními pulzy laseru ohrožující lidský zrak. [2, 13, 18]



Obr. 8 Schéma jedno-paprskového CARS [2]

#### 4.4 UV Ramanova spektroskopie

Jak bylo zmíněno v předešlých kapitolách, Ramanova spektroskopie ve viditelné oblasti spektra, prokázala schopnost detekovat celou řadu výbušnin. Pro detekci stopových prvků výbušnin je však využitelnost excitačního viditelného, nebo blízkého infračerveného (near infrared – NIR) pásma, nedostatečná vzhledem k nízké citlivosti. Při excitaci viditelným spektrem mají Ramanova pásma průřezy podobné průřezu interferencí a podkladů. To snižuje schopnost spektrální diferenciace mezi výbušnými látkami a interferenčními látkami. [13, 16]

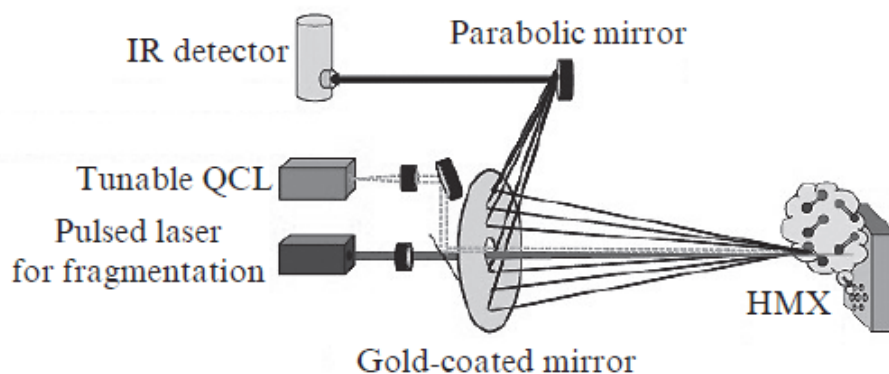
Excitace pomocí hlubokého UV záření (<260 nm) má za následek zvýšenou selektivitu a citlivost v důsledku zvýšení rezonance a minimalizaci zásahů fluorescence do hlubokého UV spektra. Zvýšení rezonance vede ke zvýšení Ramanovy intenzity molekul, které absorbují v blízkých, nebo excitačních vlnových délkách. [13]

Excitace ve viditelném spektru vlnových délek je výhodnější pro silnější vrstvy zkoumaných vzorků, kde je zanedbatelná absorpce excitačního paprsku. Buzení viditelným spektrem způsobuje Ramanův rozptyl z mnohem větší hloubky silné vrstvy vzorku, protože pronikající laserový paprsek není oslabený. Excitace UV zářením je naproti tomu vhodnější pro stopová množství výbušnin. Výhodou použití zařízení s excitačním UV zářením je také možnost použití silnějších laserů z důvodu vyšších bezpečných expozičních hodnot

UV záření pro lidské oko, což dokazuje výzkum Carrola a kol.<sup>6</sup>, kde bylo porovnáno použití excitačních vlnových délek 532 nm a 266 nm pro vzdálenou detekci. [13, 16]

#### 4.5 Mid-IR spektroskopie pulzní laserové fragmentace

Podstata detekce výbušnin pomocí metody MIR-PF (Pulsed Laser Fragmentation Mid-IR Spectroscopy) je v kombinaci pulzní laserové fragmentace a absorpční spektroskopie, která využívá pulzní laserové záření ze střední IR oblasti. Vzorek je vystaven pulznímu laserovému záření, které zahřívá stopy výbušniny, aby se rozložily na specifické fragmenty. Ty jsou desorbovány z povrchu a přecházejí do plynné fáze. Studie různých druhů výbušnin ukázaly, že optimální je fragmentaci realizovat pomocí excitačního záření o vlnové délce asi 1,5  $\mu\text{m}$ . Během laserové fragmentace výbušnin vzniká "oblak"  $\text{NO}_x$  molekul v bezprostřední blízkosti povrchu vzorku a tyto molekuly jsou detekovány různými metodami IR spektroskopie. Za tímto účelem jsou produkty výbušného rozkladu synchronně ozařovány jiným laserem, například laděným kvantovým kaskádovým laserem. Rozsah ladění tohoto laseru zahrnuje charakteristické absorpční pásma  $\text{NO}_x$  molekul v oblasti středního IR rozsahu. Signál ve formě odraženého (rozptýleného) záření je zaznamenán IR kamerou. [2, 19]



Obr. 9 Schéma pro detekci výbušnin pomocí metody MIR-PF [2]

Nicméně metoda MIR-PF, stejně jako PF-LIF, je schopna detekovat pouze výbušninu obsahující dusík. Výbušninu patřící k peroxidům však mohou být detekovány přímou

<sup>6</sup> J. A. Carroll, E. L. Izake, B. Cletus, E. Jaatinen, J. Raman Spectrosc. 2015, 46, 3.



aplikací IR spektroskopie pomocí laditelných kvantových kaskádových laserů, protože výbušniny této třídy mají vysoký tlak par. Technika MIR-PF, na rozdíl od PF-LIF, nevyžaduje UV laditelné lasery, je založená na použití dvou laserů. Nicméně moderní laserové technologie umožňují realizovat kompaktní verzi systému MIR-PF umožňující detekci na 10 m a více. Primárním problémem, který je třeba vyřešit, je odstranění vlivu interferencí. [2, 19]

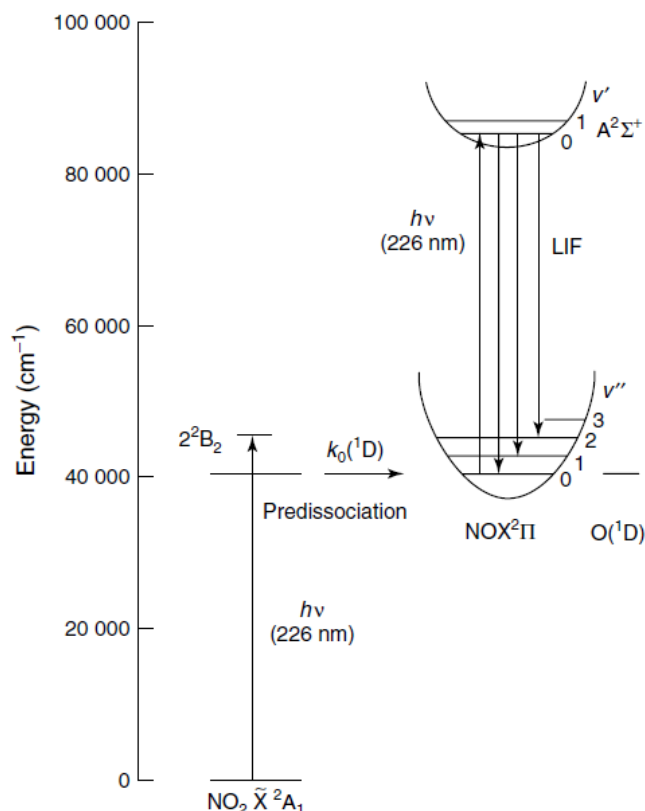
#### 4.6 Laserem indukovaná fluorescence

Laserem indukovaná fluorescence (laser-induced fluorescence – LIF) je optickou metodu, která využívá měření emisního optického záření molekul, které byly excitovány do vyšších energetických úrovní absorpcí laserového záření. Hlavní výhodou použití fluorescenční detekce ve srovnání s jinými absorpčními metodami je větší dosažitelná citlivost, protože fluorescenční signál má velmi slabé rušivé pozadí. [2, 11]

Metoda LIF se pro detekci výbušnin obvykle kombinuje s fotofragmentací (photofragmentation – PF) za účelem fotofragmentace (resp. fotodisociace) cílové molekuly a následného zjištění fluorescence vygenerovaných fotofragmentů. Použití fotofragmentace je důsledkem toho, že fluorescence většiny výbušnin je slabá, zatímco intenzita fluorescence oxidu dusnatého (NO) produkovaného fotofragmentací je silná a umožňuje detekci nízkých koncentrací výbušnin. Tato metoda má tu výhodu, že je velmi citlivá a snadno aplikovatelná. [2, 11]

Příkladem využití PF-LIF (Fotofragmentace následovaná laserem indukovanou fluorescencí) může být princip detekce TNT. Obrázek č. 9 znázorňuje diagram energetické úrovně NO a NO<sub>2</sub> (oxid dusičitý) a ilustruje proces PF-LIF. „Proces začíná fotofragmentací TNT, aby se uvolnila slabě vázaná funkční skupina NO<sub>2</sub> (40-50 kcal mol<sup>-1</sup>). Tato funkční skupina NO<sub>2</sub> je zodpovědná za slabou absorpci TNT poblíž vlnové délky 226 nm. Záření fotodisociuje TNT a vytváří NO<sub>2</sub> v základním elektronovém stavu ( $X^2 A_1$ ). Vygenerovaný NO<sub>2</sub> pak absorbuje foton o vlnové délce 226 nm a prochází přechodem do elektronového stavu  $2^2 B_2$ . Stav  $2^2 B_2$  se predisociuje, aby produkoval NO v základním vibračním stavu základního elektronového stavu ( $X^2 \Pi, v'' = 0$ ) a atomového kyslíku. NO v základním stavu poté absorbuje další foton o vlnové délce 226 nm, aby podstoupil rezonanční přechod ( $A^2 \Sigma^+ v' = 0 \rightarrow X^2 \Pi v'' = 0$ ), což produkuje fluorescenci oxidu dusnatého ( $A^2 E^+ v' = 0 \rightarrow X^2 \Pi v'' = n$ , kde  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ )“ [11] PF a predisociace jsou dosaženy stejnou UV laserovou

frekvencí. To umožňuje jednoduché experimentální nastavení detekce nitrosloúčenin. Intenzita fluorescence NO souvisí s koncentrací TNT ve vzorku.



Obr. 10 Schéma energetických úrovní ilustrující PF-LIF proces [11]

Využití metody LIF se uplatňuje zejména k detekci nitrosloúčenin, jako je např. TNT, nitrobenzen, nebo dinitrobenzenu. Citlivost PF/LIF je velmi závislá na spektroskopických vlastnostech cílové molekuly, detekovaný fragmentu a použitém laserovém systému. Jelikož je metoda silně závislá na charakteristikách laserového záření, aplikace a citlivost PF/LIF má potenciál v budoucnu ještě dále zlepšovat v důsledku vývoje lepších laserových systémů. [11, 20]

#### 4.6.1 Další metody detekce využívající princip fluorescence

Kromě PF/LIF byly pro detekci výbušnin použity i jiné techniky založené na fluorescenci. Jian a Seitz<sup>7</sup> zkoumali optickou detekci nitro sloučenin založenou na potlačování fluorescenčního záření. V této práci použili vodné nitrosloúčeniny, které byly vedeny

<sup>7</sup>C. Jian, W.R. Seitz, 'Membrane for In Situ Optical Detection of Organic Nitro Compounds Based on Fluorescence Quenching', Anal. Chim. Acta, 237(2), 265–271 (1990).

přes membránu obsahující fluorofor, emisní intenzita fluoroforů byla při průchodu vzorku membránou snížena. Výsledek je použitelný pouze pro nitrozloučeniny, navíc tato metoda nemůže být použita k identifikaci konkrétní sloučeniny. Vyčištění dusíku před měřením eliminovalo rušení kyslíkem a zvýšilo citlivost. [11]

Crowson a kol.<sup>8</sup> zkoumali detekci výbušnin chemiluminiscencí v plynné fázi. Dospěli k závěrům, že tepelným rozložením výparů z různých výbušných sloučenin dochází k vzniku modro-zelené chemiluminiscenční emise. Jednoduché alkylnitráty jsou více tepelně stabilní, a proto mohou být detekovány při nižších koncentracích než RDX, nebo PETN. Pro TNT nebyl zaznamenán žádný signál. Pro čisté páry výbušnin se limity detekce přiblížily limitu přesných měření tlaku. Použití nosných plynů pro vzorek významně snížilo dosažitelné limity detekce, významné zlepšení bylo dosaženo s dusíkem, a dokonce větší zlepšení s heliem. Stejně jako popsaná metoda v odstavci výše, chemiluminiscenční metoda neidentifikuje, který výbušný materiál je přítomen, ale může být použita pro monitoring. [11]

---

<sup>8</sup> A. Crowson, R.W. Hiley, T. Ingham, T. McCreedy, A.J. Pilgrim, A. Townshend, 'Investigation Into the Detection of Nitrated Organic Compounds and Explosives by Direct Chemiluminescent Emission During Thermally Induced Gas Phase Decomposition Reactions', *Anal. Commun.*, 34(8), 213–216 (1997).

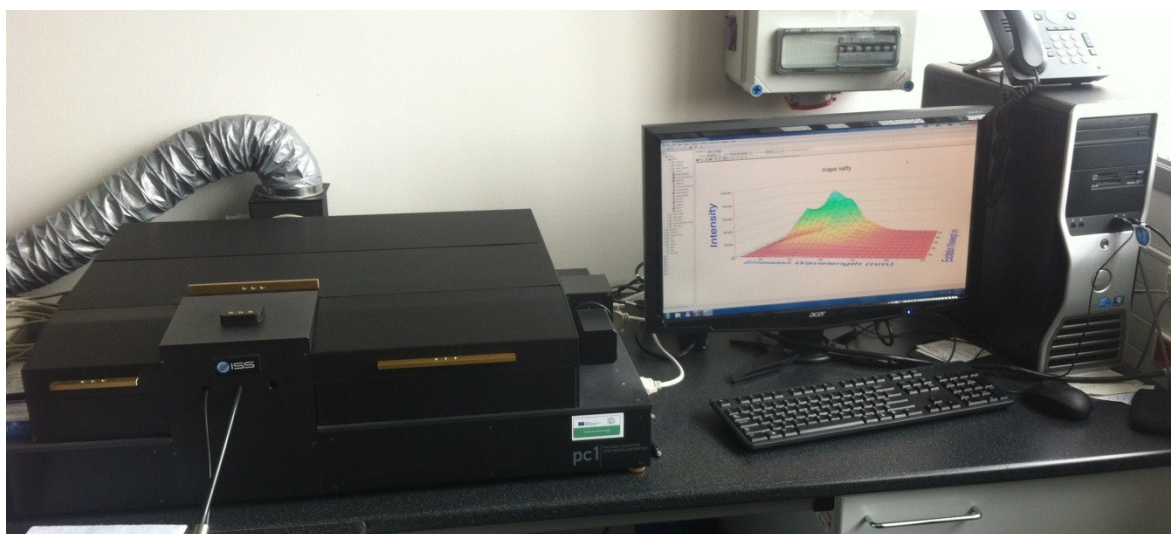
## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 LUMINISCENČNÍ SPEKTROSKOPIE VYBRANÉ VÝBUŠNINY

Pro analýzu vybraného exploziva byla použita metoda fluorescenční spektroskopie. V této kapitole bude popsána měřící aparatura i vybraná výbušnina.

### 5.1 Přístroj pro měření luminiscenčních spekter

Měření luminiscenčních spekter proběhlo na kompaktním stolním spektrofluorimetru pc1 firmy ISS a stolním počítači se softwarem Vinci.



Obr. 11 Spektrofluorimetr pc1 a stolní počítač [vlastní zdroj]

#### 5.1.1 Specifikace přístroje

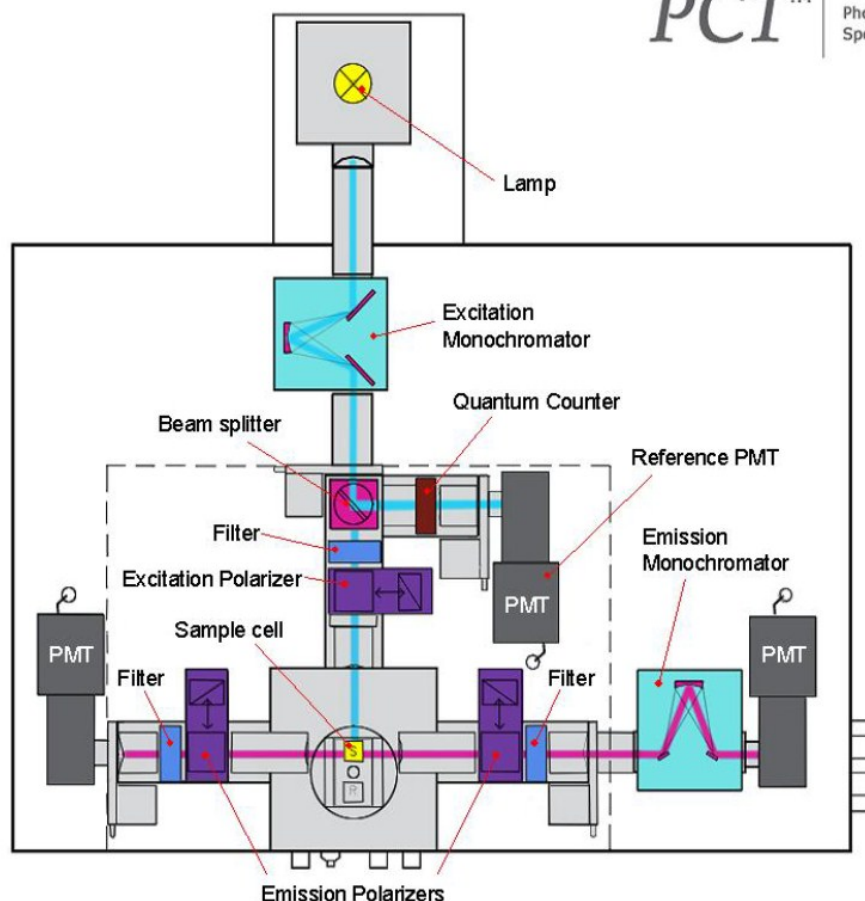
- Zdroj světla: 300 W xenonová oblouková lampa, jas 45 mW/nm při 275 nm
- Monochromátory: Vysoce účinné jednovláknové holografické mřížkové monochromátory
  - Rozsah vlnových délek: 200 nm až 1200 nm (v závislosti na zvolené optické mřížce)
  - Přesnost vlnové délky:  $\pm 0,2$  nm
- Zaostřování: Princip paralelního paprsku pro přesné polarizační měření
- Polarizátory: UV Glan-Thompson
- Detektory: boční fotonásobiče (PMT - photomultiplier tube)
- Režimy detekce: 80 MHz předzesilovače/diskriminátory pro rychlé počítání fotonů na třech nezávislých kanálech
- Citlivost: poměr S/N (signal to noise) větší než 6000: 1 v Ramanově spektru vody

- Dynamický rozsah: Lineární až osm milionů countů za sekundu
- Operační systém PC: Windows 7
- Napájení: univerzální příkon 110-240 V, 50/60 Hz, 400 VAC
- Rozměry: 885 mm (délka) x 600 mm (šířka) x 330 mm (výška)
- Hmotnost: 43 Kg [20]



PC1™

Photon Counting Spectrofluorometer



Obr. 12 Grafické znázornění rozložení pc1 [22]

## 5.2 Vinci software

Vinci poskytuje plnou kontrolu nad všemi automatizovanými součástmi přístrojů, včetně uzávěrů, polarizátorů, držáků vzorků a monochromátorů.

Vinci nabízí snadno použitelné uživatelské rozhraní a řadu možností získávání dat. Umožňuje uživateli generovat, ukládat vlastní protokoly pro získávání dat a jejich prezentaci ve 2D a 3D grafech. Data jsou uložena ve formátu ASCII pro využitelnost v jiných softwarových balíčcích.

### 5.3 Vybraná výbušnina

Pro spektroskopické měření byla zvolena výbušnina na bázi dusičnanu amonného ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ). Dusičnan amonný je bílá krystalická látka, ve formě menších krystalků až jemného prášku. Je možné se také setkat s názvem „ledek amonný“, nebo „amoniumnitrát“, jenž vychází z anglického překladu „*ammonium nitrate*“. V čistém stavu se jedná o stabilní, téměř necitlivou látku. Průmyslově se dusičnan amonný vyrábí reakcí amoniaku s kyselinou dusičnou, nejčastější využití pak nachází v zemědělství, jakožto hnojivo a jako složka výroby průmyslových trhavin. „*Trhaviný na bázi dusičnanu amonného jsou zneužívány řadou teroristických organizací či jednotlivců (IRA, Al-Káida, ETA, FARC, Breivik)*“ [1]

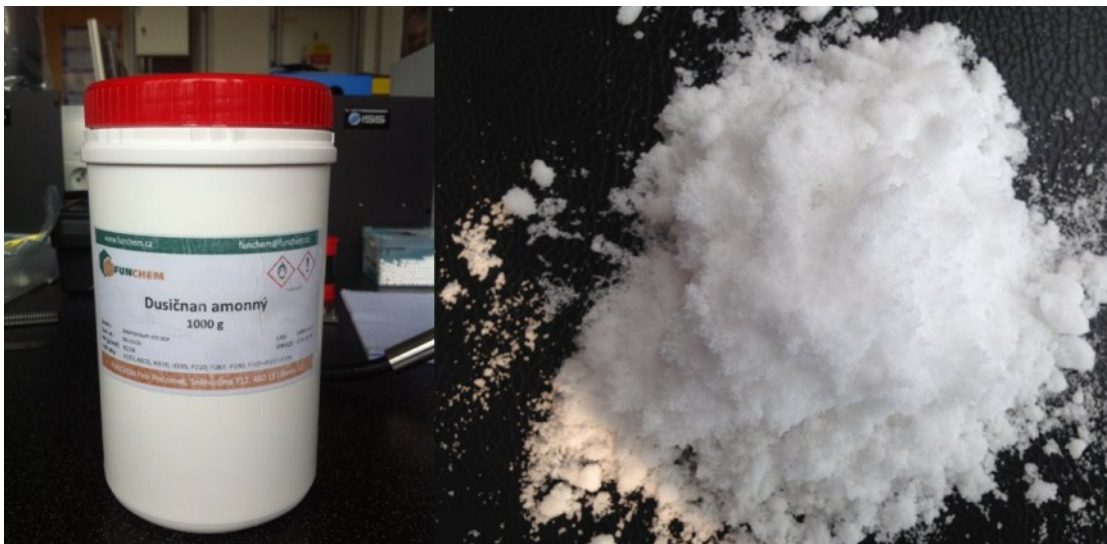
Nevýhodou dusičnanu amonného je jeho vlastnost hygroskopicity, snadné pohlcování vzdušné vlhkosti vede k jeho znehodnocení, což klade nároky na jeho skladování. Částečnou nevýhodou je i velmi malá citlivost k vnějším podnětům, ideální je tedy iniciace jinou počinovou výbušninou. [1]

Nejrozšířenější výbušninou na bázi dusičnanu amonného je směs této látky s olejem, nebo motorovou naftou označovaná anglickou zkratkou ANFO (*ammonium nitrate – fuel oil*), v české prostředí DAP (dusičnan amonný – palivo). Pro svou jednoduchou přípravu a velký ničivý potenciál patří mezi velmi často podomácku vyráběné výbušniny, výkonem může konkurovat i průmyslovým trhavinám. Důkazem může být teroristický bombový útok Anderse Behringa Breivika na vládní budovu v Oslu v roce 2011, nebo bombový útok spáchaný Timothy Jamesem McVeighem v americkém městě Oklahoma City v roce 1995. V obou případech byly výbušniny umístěny v zaparkovaném automobilu blízko cíle a dálkově odpáleny. Výkon směsi může být navýšen přidávkem práškového kovu, např. hliníku, což bylo realizováno v případě útoku Anderse Breivika. [23]

Vzhledem k událostem v Oslu, přestože Norsko není členem Evropské unie (EU), se rozhodly členské státy EU vyvinout snahu k omezení šíření a držení snadno dostupných látek použitelných k výrobě výbušnin, tzv. prekurzorů výbušnin. V České republice platí „*Zákon č. 259/2014 Sb. Zákon o prekurzorech výbušnin*“, který v návaznosti na schválené „*Narižení Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 98/2013 ze dne 15. ledna 2013 o uvádění prekurzorů výbušnin na trh a o jejich používání*“ stanovuje „*podmínky pro uvádění prekurzorů výbušnin na trh a jejich používání, práva a povinnosti při zpřístupnění a dovozu prekurzorů výbušnin, při jejich držení, používání, a dále při jejich povolování, registraci a oznamování*“. [24] Dusičnan amonný je jednou z látek na tomto seznamu.

## 6 MĚŘENÉ VZORKY

ANFO, jakožto zkoumaná výbušnina (trhavina), byla vybrána zejména pro její stabilitu a bezpečnost při manipulaci, ale i jako příklad velmi často používané výbušniny.



Obr. 13 Dusičnan amonný použitý při měření [vlastní zdroj]

Naměřena byla luminiscenční spektra mapy čistého dusičnanu amonného, slunečnicového oleje a motorové nafty. Slunečnicový olej a nafta jsou složky, které mohou plnit funkci paliva ve směsi ANFO. Směs ANFO byla namíchána ve složení 96% dusičnanu a 6% paliva. Všechny vzorky byly měřeny v kyvetě z křemenného skla, která poskytuje nejnížší fluorescenční pozadí. Při manipulaci s kyvetou je potřeba se vyvarovat zanechání otisku prstu na stěně kyvety, jelikož zanechaný otisk může vytvořit znehodnocující fluorescenční pozadí.



Obr. 14 Kyveta z křemenného skla [vlastní zdroj]



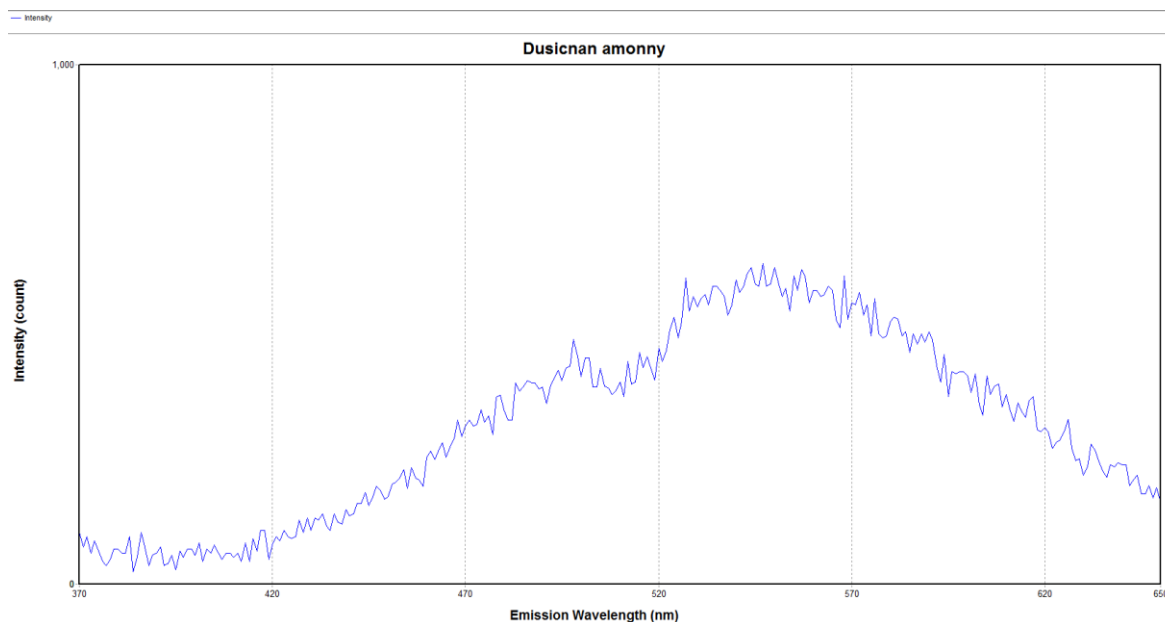
## 7 NAMĚŘENÁ LUMINISCENČNÍ SPEKTRA

Následující podkapitoly prezentují naměřená luminiscenční spektra, popřípadě luminiscenční mapy, všech měřených vzorků. Naměřená emisní spektra jsou závislostí intenzity fluorescence na vlnové délce při konstantní vlnové délce excitačního záření. Excitační spektra jsou závislostí intenzity fluorescence na vlnové délce při konstantní vlnové délce emitovaného záření.

Při měření luminiscenční mapy dochází k tomu, že excitační monochromátor skenuje mezi dvěma vlnovými délkami s nastavenou velikostí kroku. V každé pozici excitačního monochromátoru pak emisní monochromátor skenuje mezi dvěma vlnovými délkami.

### 7.1 Dusičnan amonný

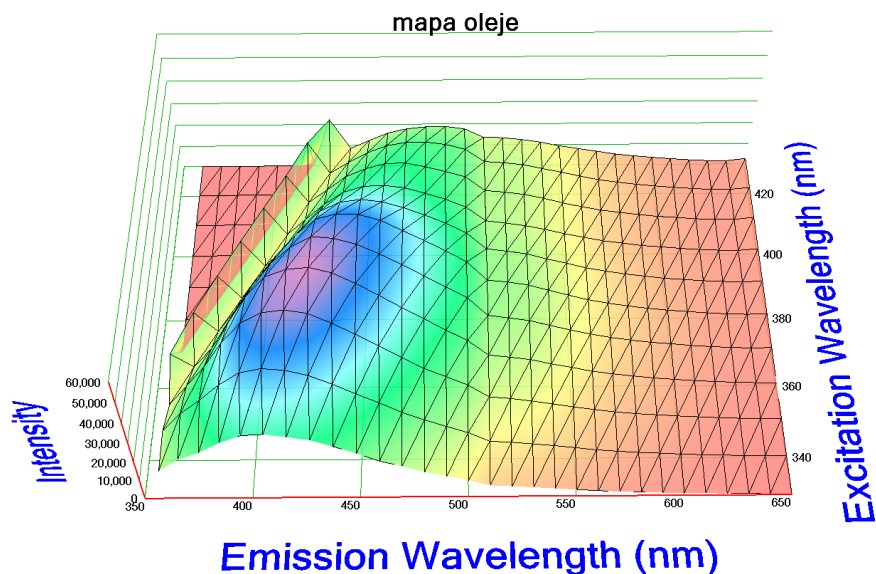
Emisní spektrum dusičnanu amonného bylo měřeno v rozsahu 370 nm až 650 nm při excitační vlnové délce 355nm. Naměřené spektrum ukazuje jeho velmi slabou intenzitu luminiscence, jež dosahuje vrcholu kolem 545 nm při intenzitě cca 600 countů.



Obr. 15 Emisní spektrum dusičnanu amonného [vlastní zdroj]

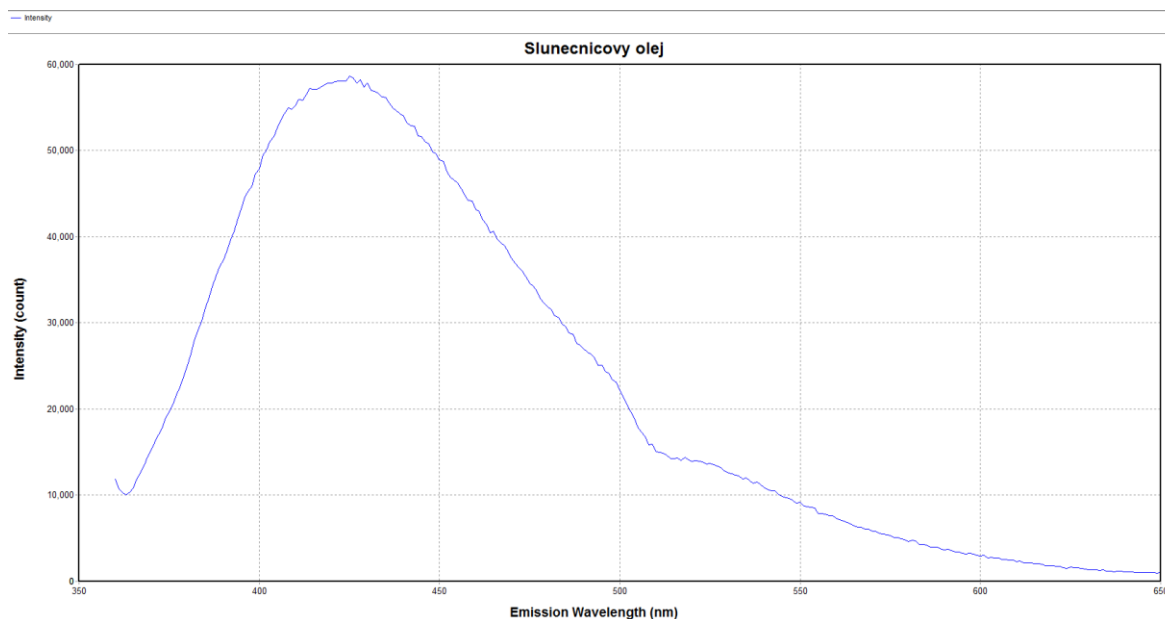
## 7.2 Slunečnicový olej

Na základě následující luminiscenční mapy, která byla měřena pro rozsah excitační vlnové délky 330 nm až 430 nm a v rozsahu snímaného emisního spektra 350 nm až 650 nm, byla pro slunečnicový olej vybrána excitační vlnová délka 360 nm, která vykazovala nejlepší parametry k excitaci.



Obr. 16 Luminiscenční mapa slunečnicového oleje [vlastní zdroj]

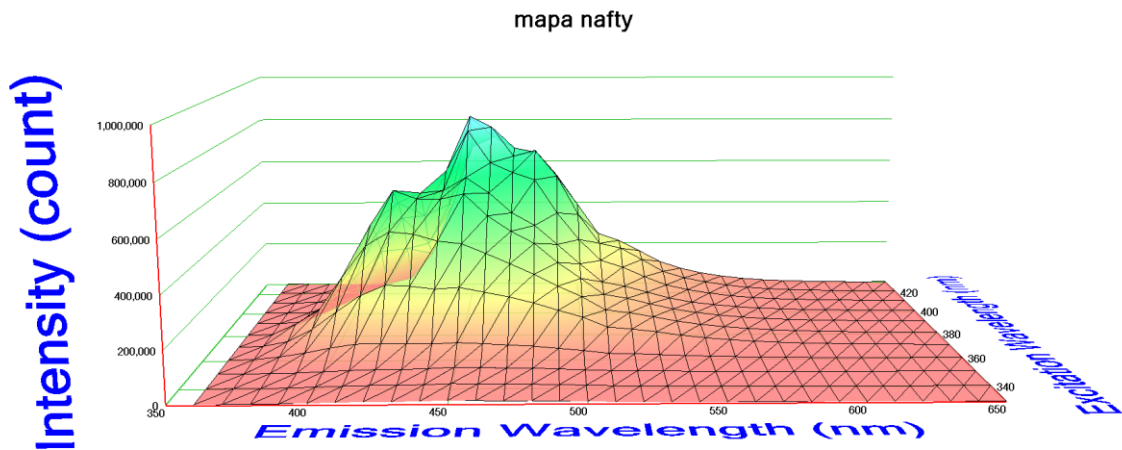
Slunečnicový olej při excitační vlnové délce 360 nm dosahuje vrcholu v emisním spektru v hodnotě kolem 425 nm při intenzitě cca 58 000 countů.



Obr. 17 Emisní spektrum slunečnicového oleje [vlastní zdroj]

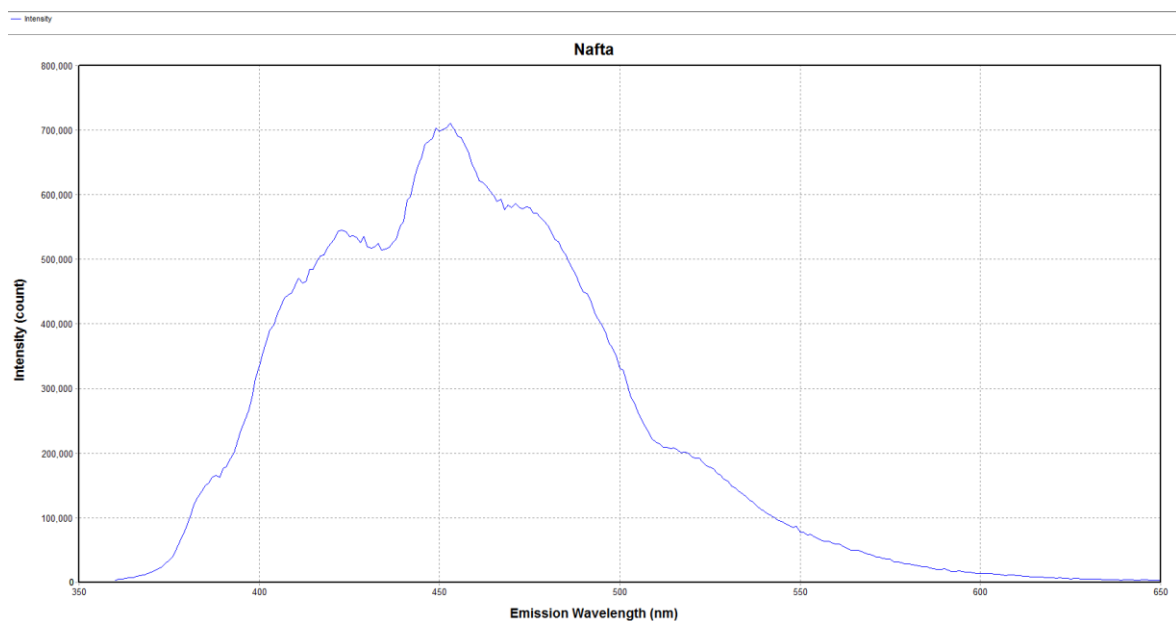
### 7.3 Motorová nafta

Na základě naměřené luminiscenční mapy motorové nafty, která byla měřena pro rozsah excitační vlnové délky 330 nm až 430 nm a v rozsahu emisního spektra 360 nm až 650 nm, byla zvolena excitační vlnová délka 420 nm, která vykazovala nejvyšší hodnoty v emisním spektru.



Obr. 18 Luminiscenční mapa motorové nafty [vlastní zdroj]

Pro excitační vlnovou délku 420 nm motorová nafta vykazovala velmi silnou emisní luminiscenci, která dosahovala vrcholu v hodnotě kolem 450 nm, intenzita v tomto bodě činila cca 700 000 countů.



Obr. 19 Emisní spektrum motorové nafty [vlastní zdroj]

## 7.4 ANFO

Měřené vzorky ANFO ve složení 94% dusičnanu amonného a 6% paliva v podobě nafty/slunečnicového oleje vykazovaly stejné průběhy, jako samostatně naměřená emisní spektra obou použitých paliv a neposkytovaly tak dostatečně specifické a charakteristické průběhy k rozlišení, zda se jedná pouze o palivo, nebo směs ANFO. Vzhledem k velmi malé emisní luminiscenci dusičnanu amonného závisí emisní spektrum a vyzařovaná intenzita směsi ANFO na použitém palivu. Detekce výbušnin na bázi dusičnanu amonného luminiscenční spektroskopii tedy spočívá na detekci a identifikaci použitého paliva ve směsi, což je samozřejmě z hlediska identifikace výbušniny nedostačující.

## 8 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A APLIKOVANÉ METODY

Jedním z cílů této práce bylo analyzovat pomocí optické metody modelové složení výbušniny využívané v improvizovaných výbušných zařízeních. Vybranou výbušninou byla směs ANFO. Jedná se o směs, jejíž základ tvoří čistý dusičnan amonný, který v kombinaci s palivem, v tomto případě motorovou naftou nebo slunečnicovým olejem, tvoří výbušnou směs. Analýza vybrané výbušniny byla uskutečněna metodou fluorescenční spektroskopie, která analyzuje luminiscenční spektra jednotlivých vzorků.

Naměřené luminiscenční spektrum čistého dusičnanu amonného při excitační vlnové délce 355 nm vykazovalo velmi slabou emisní intenzitu v hodnotě cca 600 countů. Vzhledem k intenzitě emisní luminiscence vybraných paliv jde o naprosto zanedbatelnou hodnotu. Pro vybraná paliva byly naměřeny nejprve luminiscenční mapy, na základě jejichž 3D zobrazení byly vyhodnoceny excitační vlnové délky, které vykazovaly nejvyšší intenzitu vyvolaného luminiscenčního vyzařování. Pro slunečnicový olej se jednalo o hodnotu 360 nm, při které vzorek vykazoval intenzitu luminiscence cca 58 000 countů. Pro vzorek motorové nafty byla stanovena excitační vlnová délka 420 nm, při které nafta vykazovala intenzitu vyzařované luminiscence cca 700 000 countů. Následné měření vzorků dusičnanu amonného s vybranými palivy, ve složení 96% dusičnanu amonného + 6% paliva ukázalo, že luminiscenční parametry této směsi závisí na použitém palivu, jelikož naměřená emisní spektra měla shodný charakteristický průběh s emisními spektry samotných paliv. Základem úspěšnosti detekce je nalezení dostatečného množství charakteristických bodů v průběhu emisního spektra. Z tohoto důvodu je identifikace výbušnin na bázi dusičnanu amonného fluorescenční spektroskopii nevyhovující, jelikož jsme schopni detekovat pouze luminiscenční spektrum použitého paliva. Získané hodnoty luminiscenčních spekter by však bylo možné použít jako vstupní data ladění laseru pro metodu PF-LIF, případně LIBS.

Technika fluorescenční spektroskopie pro detekci výbušnin byla vyvinuta v posledních několika desetiletích. Jde o poměrně jednoduchou analytickou techniku. Limity detekce závisí do značné míry na vlastnostech měřeného vzorku, ale celkově dosahuje fluorescenční spektroskopie vysoké citlivosti. Mezi hlavní výhody této metody patří:

- vysoká citlivost,
- vysoká specifická,
- reprodukovatelnost,

- všestrannost,
- snadný odběr a příprava vzorků,
- nedestruktivní princip metody.

Hlavní nevýhodou je fakt, že ne všechny sloučeniny luminiskují. Vlastnosti metody také ovlivňuje použitý zdroj záření. V případě xenonové lampy je možno volit z širokého rozsahu vlnových délek, avšak na úkor slabého výkonu, výhodou je také nízká pořizovací cena. Použití laseru je výhodnější zejména kvůli vysokému výkonu při dané vlnové délce, koherenci paprsku, možnosti jeho zaostření, a také možnosti použití kontinuálního, nebo pulzního laseru, to vše na úkor ceny.

Fluorescenční spektroskopie je využívána v mnoha oborech lidské činnosti. Ve forenzních vědách a kriminalistice nachází své uplatnění především v analýze výbušnin, drog, vláken, otisků prstů, nebo povýstřelových zplodin.

## 9 POKRAČOVÁNÍ STUDIA OPTICKÝCH METOD DETEKCE VÝBUŠNIN

Výzkum detekce výbušnin je na FAI UTB poměrně nově se rozvíjející oblastí. Příležitostí pro rozvoj výzkumu v této oblasti by bylo využití pulzního Nd:YAG laseru Quanta-Ray INDI-40-10 firmy Spectra-Physics, který fakulta vlastní. Jde o pevnolátkový laser pracující v Q-spínacím režimu, který mu umožňuje produkovat v krátkých laserových impulzech mnohem větší špičkový, než kdyby pracoval v režimu kontinuálního výstupu. V základu laser produkuje v opakovací frekvenci 10 Hz vlnovou délku 1064 nm o pulzní energii 450 mJ. Základní vlnová délka 1064 nm může však být modifikována prostřednictvím modulů na další vlnové délky, a to 532, 355 a 266 nm. Tyto čtyři vlnové délky pokrývají elektromagnetické spektrum z blízkého infračerveného záření až po ultrafialové, což zvyšuje užitečnost laseru.

### Quanta-Ray INDI Series Specifications

Product <sup>1</sup>	INDI-40-10	INDI-40-20
Repetition Rate	10 Hz	20 Hz
<b>Energy (mJ/p)<sup>2</sup></b>		
1064 nm	450 mJ	420 mJ
532 nm	200 mJ	160 mJ
355 nm <sup>23</sup>	100 mJ	100 mJ
266 nm	55 mJ	40 mJ
<b>Performance Specifications</b>		
Pulse Width	6–9 ns	
Short Term energy Stability <sup>6</sup>	±2%	
Long Term Power Drift <sup>7</sup>	<3%	
<b>Beam Specifications</b>		
<b>Spatial Mode Profile<sup>8</sup></b>	<b>Standard Fit</b>	
Near Field (1 m) <sup>20</sup>	>70%	
Far Field ( $\infty$ ) <sup>20</sup>	>95%	
Modulation <sup>10, 20, 21</sup>	<30%	
Beam Diameter <sup>11</sup>	<10 mm	
Beam Pointing Stability <sup>12</sup>	<±100 $\mu$ rad	
Beam Divergence <sup>13</sup>	<0.5 mrad	
Timing Jitter <sup>16</sup>	<0.5 ns	

Obr. 20 Specifikace Quanta-Ray INDI-40-10 [25]

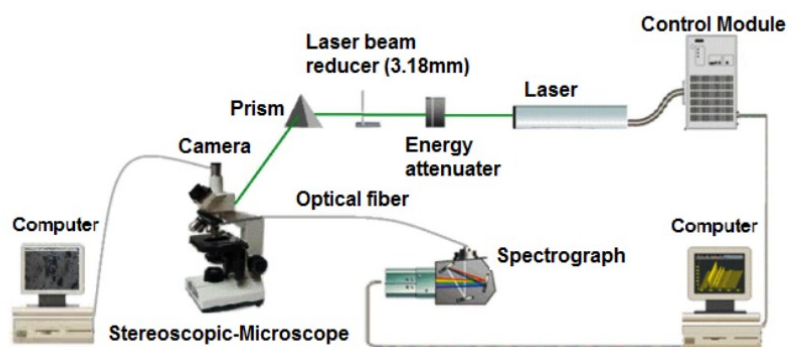
Využitelnost laseru Quanta-Ray INDI-40-10 pro detekci výbušnin by bylo možno aplikovat v optických metodách:

- spektroskopie laserem buzeného plazmatu,
- koherentní anti-Stokesova Ramanova spektroskopie,
- laserem indukovaná fluorescence.



Obr. 21 Laser Quanta-Ray INDI-40-10 [vlastní zdroj]

Příkladem využití toho laseru v metodě LIBS může být výzkum ve zdroji [26], kde byl tento laser použit k analýze povrchu nerezové oceli, nicméně by ho v této realizaci bylo možné použít i k detekci a identifikaci výbušnin. Laser byl použit pro generování plazmatu v nastavení: pracovní vlnová délka 532 nm, šířka impulsu 7ns, opakovací frekvence 10Hz. Intenzitu laseru bylo možné regulovat použitím zeslabovače. Bodová velikost laserového paprsku byla redukována hliníkovou fólií s otvorem o průměru přibližně 3,18 mm a odrážena trojúhelníkovým hranolem do bočního vstupu mikroskopu SM-LUX-POL, umožňujícího zaostření paprsku kolmo do oblasti zájmu za použití objektivu Olympus 10x. Laserový paprsek produkoval energii 2,2 mJ na impuls. Mikroskop byl použit ve stereoskopickém režimu (tj. s externím světelným zdrojem). Jako spektrometr byl použit Shamrock 500i (Andor Technology) propojený s ICCD detektorem iStart 720 Gen II (Andor Technology) o rozlišení 1024x256 pixelů a detektory 26x26 $\mu$ m. Výzkumné úkony byly řízeny PC a prováděny při atmosférickém tlaku. [26]



Obr. 22 Experimentální sestava LIBS [25]



## 9.1 Shrnutí vývojových trendů v oblasti detekce výbušnin

V současné době se používá k detekci, nebo identifikaci výbušnin, mnoho různých metod od vyhledávání za použití psů až po zobrazovací metody (např. rentgeny) a chemické identifikace (např. iontová mobilní spektrometrie). Nicméně široká škála scénářů ohrožení vytváří potřebu vývoje dalších metod. V této práci bylo prezentováno několik optických metod, které jsou v současné době rozvíjeny pro využití v oblasti detekce výbušnin. Některé z nich byly úspěšně použity v laboratorních, ale i v reálných polních podmínkách. Mezi nesporné výhody těchto metod patří zejména možnost vzdálené detekce.

Metoda LIBS poskytuje možnost elementární analýzy, ale je méně vyhovující pro detekci nízkých koncentrací reziduí výbušnin. LIBS se potýká zejména s problémem ohrožení lidského zraku, nicméně její největší výhodou je účinná vzdálenost, v tomto směru překonává všechny zmíněné metody, jelikož je použitelná i na vzdálenost až 100 metrů a lze předpokládat, že tato vzdálenost se bude v budoucnu ještě zvětšovat. V případě kratších vzdáleností jí mohou ostatní metody konkurovat.

Metoda Ramanovy spektroskopie spočívá v analýze molekulární struktury zkoumaného vzorku. Většina přenosných Ramanových spektrometrů využívá druhé harmonické frekvence (532 nm) laserového záření YAG. Nicméně v případě použití excitačního hlubokého UV spektra existují výhody, jako zvýšená intenzita buzení použitím krátké vlnové délky, zvýšená rezonance v důsledku využití vibračních pohybů a elektronových přechodů a absence fluorescenční interference. Dalším faktorem pro využití hlubokého UV spektra jsou vyšší limity pro poškození lidského zraku, než jsou pro viditelné blízké infračervené záření.

Metoda CARS je vysoce selektivní a překonává metodu Ramanovy spektroskopie zejména v citlivosti detekce. Využitelnost tato metoda nachází zejména ve středních vzdálenostech detekce, tj. kolem 50 metrů. Negativní stránkou je její složitost a finanční náročnost.

Mid-IR spektroskopii pulzní laserové fragmentace je, stejně jako PF-LIF, použitelná k detekci výbušnin obsahujících dusík, popřípadě peroxidů. Využitelná je především k detekci na kratší vzdálenosti. Potýká se s problémem interferencí.

Metoda PF-LIF je poměrně jednoduše realizovatelná, nabízí vysokou selektivitu při zkoumání vícesložkových vzorků. Přestože je zatím aplikovatelná na menší vzdálenosti, tak v budoucím vývoji by mohla dosahovat podobně jako CARS středních vzdáleností de-

tekce. Zásadní nevýhodou je použitelnost pouze pro detekci výbušnin funkční skupinu  $\text{NO}_2$  (nitrosloučeniny).

Další vývoj těchto metod pro detekci výbušnin a jejich stop souvisí s vývojem a konstrukcí kompaktních laserů se zlepšenými provozními parametry a s rozšiřováním jejich ladících rozsahů. Stejně tak důležitý bude vývoj v oblasti vysoce citlivých fotodetektorů a účinných optických systémů pro sběr světla. V následném procesu, kdy dochází ke zpracování naměřených dat, je nutné vytvoření spolehlivých algoritmů pro úspěšnou identifikaci výbušnin ve vícesložkových vzorcích a za přítomnosti interferencí. Všechny ze zmíněných metod před sebou mají stále nějaké výzvy a překážky, které bude nutné překonat, aby bylo možno plně využít jejich potenciálu, splňovaly veškeré požadavky a bylo možno je aplikovat do reálných podmínek.

## ZÁVĚR

Tato diplomová práce zabývající se problematikou využití optických metod pro detekci a identifikaci výbušnin byla vytvořena především z cizojazyčných zdrojů a zahraničních vědeckých prací na toto téma. Jde o téma, které je velmi aktuální vzhledem k bezpečnostní situaci ve světě. Výbušniny jsou velmi často využívány mnoha teroristickými skupinami a organizacemi k naplňování jejich cílů. Potřeba detekce a identifikace výbušnin, proto představuje oblast výzkumu, která je v současnosti zkoumána mnoha vědeckými skupinami z celého světa. Výzkum a vývoj sofistikovanějších optických zařízení v posledních desetiletích umožnil rozvoj zkoumání optických metod nejen při detekci a identifikaci výbušnin, ale také v celé řadě dalších vědních oborů.

Teoretická část práce byla rozčleněna do čtyř kapitol. První kapitola se zabývala obecnou problematikou výbušnin, jejich definicí a rozdělením do kategorií podle fyzikálních a chemických vlastností. Druhá kapitola popisovala aplikaci a využití výbušnin v improvizovaných výbušných systémech, které jsou významnou bezpečnostní hrozbou současnosti. Popsána zde byla také technická struktura improvizovaných výbušných zařízení a jejich ničivé účinky. Ve třetí kapitole byl popsán princip luminiscence, její druhy, a také princip spektrofluorimetrie. Čtvrtá kapitola se pak zabývala jednotlivými optickými metodami a shrnovala poznatky o jejich výzkumu, vývoji a aplikaci v oblasti detekce a identifikace výbušnin.

Praktická část práce byla členěna rovněž do čtyř kapitol. Cílem práce zde bylo analyzovat vybranou výbušninu, vyhodnotit naměřené výsledky, zhodnotit použitou metodu a navrhnout způsob pokračování studia optických metod pro detekci a identifikaci výbušnin na FAI UTB. Analyzovanou výbušninou byla směs dusičnanu amonného s motorovou naftou v prvním případě a v druhém případě byl místo nafty použit slunečnicový olej. Obě tyto „paliva“ tvoří s dusičnanem amonným v určitém poměru výbušnou směs. Jde o velmi snadno vyrobitelnou a teroristickými organizacemi i jednotlivci často používanou výbušninu. Spektrofluorimetrickou metodou byla měřena luminiscenční spektra jednotlivých složek i samotné směsi. Z naměřených dat vyplynula velmi nízká až zanedbatelná emisní intenzita luminiscence dusičnanu amonného vzhledem k použitým palivům. Luminiscenční spektra namíchané směsi pak vykazovala stejný průběh, jako spektra samotných paliv. Detekce této směsi tedy závisí na použitém palivu. V tomto ohledu se metoda spektrofluorimetrie ukázala jako nevyhovující pro detekci výbušnin na bázi dusičnanu amonného.

Naměřená spektra nicméně mohou sloužit jako vstupní data pro ladění laseru metody „spektroskopie laserem buzeného plazmatu“ a metody „laserem indukované fluorescence“. Zbývající část popisovala příležitosti FAI UTB realizovat jiné metody optické detekce a identifikace výbušnin a vývojové trendy v této oblasti. Nastíněna byla možnost realizovat metodu spektroskopie laserem buzeného plazmatu, skládající se z konkrétních prvků.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] TUREČEK, Jaroslav. Policejní pyrotechnika. Plzeň: Vydavatelství a nakladatelství Aleš Čeněk, 2014. ISBN 978-80-7380-510-4.
- [2] SKVORTSOV, L A. Laser methods for detecting explosive residues on surfaces of distant objects. *Quantum Electronics* [online]. 2012, 42(1), 1-11 [cit. 2017-05-02]. DOI: 10.1070/QE2012v042n01ABEH014724. ISSN 1063-7818. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/1063-7818/42/i=1/a=R01?key=crossref.04e6752b50e1e28a2a9f39827da8a6e6>
- [3] NATIONAL ACADEMIES AND THE DEPARTMENT OF HOMELAND SECURITY. IED Attack: improvised explosive devices.[online] Dostupné z: [http://www.dhs.gov/xlibrary/assets/prep\\_ied\\_fact\\_sheet.pdf](http://www.dhs.gov/xlibrary/assets/prep_ied_fact_sheet.pdf)
- [4] *Bojový řád jednotek požární ochrany - taktické postupy zásahu: Zásah při výskytu výbušných látek a výbušných předmětů před jejich iniciací* [online]. Ministerstvo vnitra – generální ředitelství Hasičského záchranného sboru České republiky, 2004 [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <http://www.hzscr.cz/soubor/1-12-nastrazne-vybusne-systemy-pdf.aspx>
- [5] IED and Explosive Effects Fundamentals. Office for Bombing Prevention [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: [https://www.eiseverywhere.com/file\\_uploads/170e63337bebca0287c1aaf3509af6d2\\_IEDExplosiveEffectsFundamentals.pdf](https://www.eiseverywhere.com/file_uploads/170e63337bebca0287c1aaf3509af6d2_IEDExplosiveEffectsFundamentals.pdf)
- [6] *IED Technology: An anatomy of the Improvised Explosive Device (IED)* [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: [http://www.defenceindustryreports.com/ied\\_technology.html](http://www.defenceindustryreports.com/ied_technology.html)
- [7] Improvised Explosive Devices. *CONVENTIONAL AMMUNITION IN SURPLUS: A REFERENCE GUIDE* [online]. A Small Arms Survey, s. 136-144 [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <http://www.smallarmssurvey.org/fileadmin/docs/D-Book-series/book-05-Conventional-Ammo/SAS-Conventional-Ammunition-in-Surplus-Book.pdf>
- [8] PELANT, Ivan a Jan VALENTA. Luminiscence doma, v přírodě a v laboratoři. Praha: Academia, 2014. Průhledy (Academia). ISBN 978-80-200-2394-0.
- [9] *Principy fluorescenční spektroskopie* [online]. [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <http://www1.lf1.cuni.cz/~zfsisar/fluorescence/soubory/principy.pdf>

- [10] GULIA, Sanjay, Kamal K. GULATI, Vijayeta GAMBHIR, Rinku SHARMA a M.N. REDDY. Trace detection of explosive and their derivatives in stand-off mode using time gated Raman spectroscopy. *Vibrational Spectroscopy* [online]. 2016, 87, 207-214 [cit. 2017-05-02]. DOI: 10.1016/j.vibspec.2016.10.009. ISSN 09242031. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924203116302958>
- [11] HUMMEL, R. a T. DUBROCA. Laser- and Optical-Based Techniques for the Detection of Explosives. *Encyclopedia of Analytical Chemistry* [online]. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2006 [cit. 2017-05-02]. DOI: 10.1002/9780470027318.a0716.pub2. ISBN 9780470027318. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/9780470027318.a0716.pub2>
- [12] Fyzikální princip LIBS. *LIBS laboratory* [online]. Brno: VUT, 2011 [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <http://libs.fme.vutbr.cz/index.php/teorie/fyzikalni-princip-libs-zaklady>
- [13] GARES, Katie L, Kyle T HUFZIGER, Sergei V BYKOV a Sanford A ASHER. Review of explosive detection methodologies and the emergence of standoff deep UV resonance Raman. *Journal of Raman Spectroscopy* [online]. 2016, 47(1), 124-141 [cit. 2017-05-02]. DOI: 10.1002/jrs.4868. ISSN 03770486. Dostupné z: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jrs.4868/epdf>
- [14] LÓPEZ-LÓPEZ, María a Carmen GARCÍA-RUIZ. Infrared and Raman spectroscopy techniques applied to identification of explosives. *TrAC Trends in Analytical Chemistry* [online]. 2014, 54, 36-44 [cit. 2017-05-02]. DOI: 10.1016/j.trac.2013.10.011. ISSN 01659936. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0165993613002550>
- [15] MOROS, J., J. A. LORENZO a J. J. LASERNA. Standoff detection of explosives: critical comparison for ensuing options on Raman spectroscopy–LIBS sensor fusion. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* [online]. 2011, 400(10), 3353-3365 [cit. 2017-05-02]. DOI: 10.1007/s00216-011-4999-y. ISSN 1618-2642. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00216-011-4999-y>
- [16] CARROLL, Joshua A, Emad L IZAKE, Biju CLETUS a Esa JAATINEN. Eye-safe UV stand-off Raman spectroscopy for the ranged detection of explosives in the field. *Journal of Raman Spectroscopy* [online]. Wiley-blackwell, 2015, 46(3),

- 333-338 [cit. 2017-05-02]. DOI: 10.1002/jrs.4642. ISSN 03770486. Dostupné z: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jrs.4642/pdf>
- [17] DOTY, Kyle C, Claire K MURO, Justin BUENO, Lenka HALÁMKOVÁ a Igor K LEDNEV. What can Raman spectroscopy do for criminalistics? *Journal of Raman Spectroscopy* [online]. Wiley-blackwell, 2016, 47(1), 39-50 [cit. 2017-05-02]. DOI: 10.1002/jrs.4826. ISSN 03770486. Dostupné z: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jrs.4826/pdf>
- [18] MUNSON, Chase A., Jennifer L. GOTTFRIED, Frank C. DE LUCIA, Kevin L. MCNESBY a Andrzej W. MIZIOLEK. *Laser-Based Detection Methods for Explosives* [online]. Army research laboratory, 2007 [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <http://www.arl.army.mil/arlreports/2007/ARL-TR-4279.pdf>
- [19] *STANDOFF EXPLOSIVE DETECTION* [online]. IQT QUARTERLY [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <http://geniaphotonics.com/wp-content/uploads/2012/04/Standoff-Explosive-Detection.pdf>
- [20] WYNN, Charles M., Stephen PALMACCI, Roderick R. KUNZ a Mordechai ROTHSCHILD. *A Novel Method for Remotely Detecting Trace Explosives* [online]. [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: [https://www.ll.mit.edu/publications/journal/pdf/vol17\\_no2/17\\_2\\_1Wynn.pdf](https://www.ll.mit.edu/publications/journal/pdf/vol17_no2/17_2_1Wynn.pdf)
- [21] *Pc1: photon counting steady-state spectrofluorimeter* [online]. ISS, 2012 [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: [http://www.iss.com/resources/pdf/datasheets/ISS\\_PC1\\_DataSheet.pdf](http://www.iss.com/resources/pdf/datasheets/ISS_PC1_DataSheet.pdf)
- [22] *Photon Counting Steady-State Spectrofluorometer: ISS PC1 User Manual*. 4. USA, 2006.
- [23] PÍŠALA, Jan a Michaela HAVLOVÁ. Možnosti nelegální výroby výbušnin a nebezpečí s ní související. *Časopis výzkumu a aplikací v profesionální bezpečnosti* [online], 2012, roč. 5, č. 3-4. ISSN 1803-3687. [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <http://www.bozpinfo.cz/josra/josra-03-04-2012/rizika-vybusnin.html>
- [24] ČESKO. § 1 odst. 1 zákona č. 259/2014 Sb., o prekurzorech výbušnin a o změně zákona č. 634/2004 Sb., o správních poplatcích, ve znění pozdějších předpisů (zákon o prekurzorech výbušnin). In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010-2017 [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2014-259#p1-1>

- [25] *Quanta-Ray® Nd:YAG Laser Family* [online]. Spectra-Physics [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: [http://www.spectra-physics.com/assets/client\\_files/files/documents/datasheets/Quanta-Ray%20data%20sheet.pdf](http://www.spectra-physics.com/assets/client_files/files/documents/datasheets/Quanta-Ray%20data%20sheet.pdf)
- [26] PINTO, M, X CALDERÓN, E Mejía OSPINO, R CABANZO a Juan C POVEDA. Surface characterization of stainless HP-40 steel using laser induced  $\mu$ -breakdown spectroscopy ( $\mu$ -LIBS). *Journal of Physics: Conference Series* [online]. 2016, **687**, 012111- [cit. 2017-05-02]. DOI: 10.1088/1742-6596/687/1/012111. ISSN 1742-6588. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/1742-6596/687/i=1/a=012111?key=crossref.d8fa013d2eb693cca1a1dbbecd51ed7d>



**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

TNT	Trinitrotoluen.
RDX	Cyklotrimethyltrinitramin.
PETN	Pentaerythritol tetranitrát.
TATP	Triaceton triperoxid.
IED	Improvised explosive device (Improvizované výbušné zařízení).
NVS	Nástražný výbušný systém.
ANFO	Ammonium nitrate/fuel oil (Dusičnan amonný/palivo).
LIBS	Laser-induced breakdown spectroscopy (Spektroskopie laserem buzeného plazmatu).
ICCD	Intensified charge-coupled device (Intenzifikované zařízení s vázanými náboji).
Nd:YAG	Neodymium-doped yttrium aluminium garnet.
PMMA	Polymethylmethakrylát.
DNT	Dinitrotoluen.
KClO <sub>3</sub>	Chlorečnan draselný.
NaClO <sub>3</sub>	Chlorečnan sodný.
fs-LIBS	Femtosecond laser-induced breakdown spektrometry.
UV	Ultraviolet (Ultrafialový).
CARS	Coherent anti-Stokes Raman spectroscopy (Koherentní anti-Stokesova Ramanova spektroskopie)
LIF	Laser-induced fluorescence (Laserem indukovaná fluorescence).
PF-LIF	Photofragmentation Followed by Laser-Induce Fluorescence (Fotofragmentace následovaná laserem indukovanou fluorescencí).
NO	Oxid dusnatý.
NO <sub>2</sub>	Oxid dusičitý.

PMT	Photomultiplier tube (fotonásobič).
S/N	Signal to noise (poměr signálu k šumu).
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	Dusičnanu amonný.
DAP	Dusičnan amonný/palivo.
EU	Evropské unie.
FAI UTB	Fakulta aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati.

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1 Struktura IED [5] .....	16
Obr. 2 Způsoby iniciace IED [7] .....	17
Obr. 3 Způsoby dopravy IED k cíli [7].....	18
Obr. 4 Schématické znázornění LIBS [11] .....	24
Obr. 5 Vozíkový LIBS pro vzdálenou detekci výbušnin [13] .....	25
Obr. 6 Schéma Ramanova rozptylu [11] .....	27
Obr. 7 Princip excitace Raman-LIBS spekter [15] .....	28
Obr. 8 Schéma jedno-paprskového CARS [2].....	30
Obr. 9 Schéma pro detekci výbušnin pomocí metody MIR-PF [2] .....	31
Obr. 10 Schéma energetických úrovní ilustrující PF-LIF proces [11] .....	33
Obr. 11 Spektrofluorimetr pc1 a stolní počítač [vlastní zdroj] .....	36
Obr. 12 Grafické znázornění rozložení pc1 [22] .....	37
Obr. 13 Dusičnan amonný použitý při měření [vlastní zdroj] .....	39
Obr. 14 Kyveta z křemenného skla [vlastní zdroj] .....	39
Obr. 15 Emisní spektrum dusičnanu amonného [vlastní zdroj].....	40
Obr. 16 Luminiscenční mapa slunečnicového oleje [vlastní zdroj].....	41
Obr. 17 Emisní spektrum slunečnicového oleje [vlastní zdroj].....	41
Obr. 18 Luminiscenční mapa motorové nafty [vlastní zdroj].....	42
Obr. 19 Emisní spektrum motorové nafty [vlastní zdroj] .....	42
Obr. 20 Specifikace Quanta-Ray INDI-40-10 [25] .....	46
Obr. 21 Laser Quanta-Ray INDI-40-10 [vlastní zdroj] .....	47
Obr. 22 Experimentální sestava LIBS [25].....	47

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Bezpečná vzdálenost v závislosti na hmotnosti nálože [4].....	20
--	----