

Terahertzová spektroskopie pro detekci výbušných látek

Bc. Michal Krčma

Diplomová práce
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal Krčma**
Osobní číslo: **A12347**
Studijní program: **N3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Terahertzová spektroskopie pro detekci výbušných látek**

Téma anglicky: **Terahertz Spectroscopy for the Detection of Explosives**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou detekce výbušných látek pomocí THz spektroskopie a proveďte rešerši současné literatury zabývající se tímto tématem.
2. Připravte vzorky výbušných látek pro spektroskopické měření v THz oblasti spektra.
3. Naměřte data na připravených vzorcích pomocí spektroskopů TPS Spectra 3000 a OSCAT.
4. Zpracujte naměřená data a uveďte je pomocí přehledových grafů.
5. Vyhodnoťte výsledky a diskutujte o jejich uplatnitelnosti v bezpečnostním průmyslu.
6. Naznačte budoucí vývoj terahertzové spektroskopie pro detekci výbušných látek.

kozsan diplomove prace:

Rozsah príloh:

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. LEE, Yun-Shik. Principles of Terahertz Science and Technology. Oregon : Springer, 2009. 340 s. ISBN 978-0-387-09539-4.
2. ROSTAMI, Ali; RASOOLI, Hassan; BAGHBAN, Hamed. Terahertz Technologies: Fundamental and Applications. Berlin : Springer, 2010. 255 s. ISBN 978-3-642-15792-9.
3. FEDERICI, John, et al. THz imaging and sensing for security applications: explosives, weapons and drugs. In Semiconductor Science and Technology. United Kingdom : [s.n.], 2005. s. 266-280. Dostupné z: stacks.iop.org/SST/20/S266.
4. ETAYO, D., I. MAESTROJUAN, J. TENIENTE, I. EDERRA a R. GONZALO. Experimental Explosive Characterization for Counterterrorist Investigation. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. 2013, vol. 34, 7-8, s. 468-479. DOI: 10.1007/S10762-013-9988-0. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10762-013-9988-0>.
5. GAVENDA, Tomáš; KŘESÁLEK, Vojtěch. Terahertz time-domain spectroscopy for distinguishing different kinds of gunpowder. SPIE Proceedings: Millimetre Wave and Terahertz Sensors and Technology VI. 2013, vol. 8900. DOI: 10.1117/12.2034126. Dostupné z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.2034126>.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Tomáš Gavenda

Ústav elektroniky a měření

Datum zadání diplomové práce:

7. února 2014

Termín odevzdání diplomové práce:

27. května 2014

Ve Zlíně dne 7. února 2014

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
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 předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- 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 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

.....
podpis diplomanta

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá možnostmi využití spektroskopie v různých oblastech bezpečnostních technologií, zejména ale při odhalování a zobrazování střelných prachů. Práce je zaměřena na terahertzovou spektroskopii, která nabízí unikátní vlastnosti a možnosti detekce výbušných a jiných nebezpečných látek. Díky charakteristickým vlastnostem, které se při použití terahertzových vln projevují, je možné jednoznačně identifikovat konkrétní druh látky. V diplomové práci je vysvětlen pojem terahertzové záření a popsány principy detekce látek, které byly využity při měření. Praktická část se věnuje měření a zjišťování charakteristických vlastností střelných prachů a jejich zobrazování. Získané hodnoty jsou vyjádřeny v grafech a vzájemně porovnány.

Klíčová slova:

Terahertzová spektroskopie, terahertzové vlny, záření, bezpečnostní technologie, výbušniny, střelný prach, nebezpečné látky, detekce, zobrazování

ABSTRACT

This diploma thesis deals with possibility of using spectroscopy in many different ways in security technologies. The diploma thesis is mainly focused on terahertz spectroscopy which offers unique opportunity to detect explosives and other dangerous materials. Thanks to their characteristic properties, which are present during use of terahertz radiation, it is possible to identify specific kind of dangerous material. In the diploma thesis concept of terahertz radiation is explained and their characteristics are described. Practical part of the diploma thesis is focused on measurement and detection characteristic properties of gunpowder and their imaging. Measured values are shown in graphs and compared with each other.

Keywords:

Terahertz spectroscopy, terahertz waves, radiation, security technologies, explosives, dangerous materials, gunpowder, detection, screening

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Tomáši Gavendovi za metodickou pomoc, cenné rady, připomínky a odborné vedení, které mi při zpracování této práce poskytl.

Ve Zlíně dne 25.5.2014

.....

podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD.....	8
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 TERAHERTZOVÉ ZÁŘENÍ.....	11
1.1 VLASTNOSTI TERAHERTZOVÉHO ZÁŘENÍ	12
1.2 GENEROVÁNÍ THZ ZÁŘENÍ	13
1.2.1 Fotovodivá anténa	15
2 IDENTIFIKACE A ODHALOVÁNÍ VÝBUŠNIN.....	16
2.1 ALTERNATIVNÍ DETEKCE VÝBUŠNIN	17
2.2 METODY DETEKCE A IDENTIFIKACE NEBEZPEČNÝCH LÁTEK A PŘEDMĚTŮ.....	17
2.2.1 ATR spektroskopická metoda – „metoda zeslabeného celkového odrazu“	20
2.3 PRINCIP DETEKCE A IDENTIFIKACE NEBEZPEČNÝCH LÁTEK A PŘEDMĚTŮ	21
3 MOŽNÉ ZDRAVOTNÍ RIZIKO POUŽITÍ TERAHERTZOVÝCH VLN	24
II PRAKTICKÁ ČÁST	26
4 PŘÍPRAVA VZORKŮ	27
5 MĚŘENÍ.....	31
5.1 TPS SPECTRA 3000	31
5.2 TERA OSCAT	32
5.3 PRŮBĚH MĚŘENÍ	33
6 VÝSLEDKY	34
6.1 ATR SPEKTROSKOPIE.....	34
6.2 TRANSMISNÍ SPEKTROSKOPIE	35
6.3 THZ ZOBRAZOVÁNÍ	40
6.3.1 Analýza dat na vybraných frekvencích.....	42
ZÁVĚR	46
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	48
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	50
SEZNAM OBRÁZKŮ	51
SEZNAM TABULEK.....	52

ÚVOD

Spektroskopie je fyzikální obor zabývající se vznikem a vlastnostmi spekter. Je to metoda založená na interakci elektromagnetického záření se vzorkem dané látky. Každá látka totiž na elektromagnetické záření reaguje jinak. Některá látka záření absorbuje, jiná naopak odráží nebo reaguje jiným specifickým způsobem. Na základě těchto známých vlastností látek lze použitím vhodného typu spektroskopie odhalit potenciálně nebezpečné látky, jako jsou drogy, výbušniny nebo jiné chemické látky. V posledních letech zaznamenala spektroskopie velký rozvoj, zejména za účelem zvyšování bezpečnosti. Metody spektroskopie lze využít v mnoha vědních oborech nebo i ve zdravotnictví, kde se zkoumá přítomnost a koncentrace látek v těle. V bezpečnostních technologiích můžeme uplatnění pro spektroskopii najít zejména při letištních kontrolách, kde je kladen mimořádný důraz na bezpečnost cestujících. Po minulých událostech a zkušenostech se tak dá odhalit a předejít potenciálnímu nebezpečí při sledování znaků, jako jsou zbytky výbušných látek nebo drog na oděvu nebo efektivnější kontrole zavazadel.

Detekce výbušných a nebezpečných látek byla v uplynulých letech předmětem soustředění zájmů mnoha výzkumů, jelikož je tohle téma úzce spjato právě se zvyšováním bezpečnosti, a to hlavně v oblasti přepravy cestujících. Dochází tak na základě monitorování a sledování přítomnosti nebezpečných látek. Mnoho z často používaných výbušnin v pevném skupenském stavu má specifický otisk právě v oblasti terahertzového záření. Patří sem látky, jako je například TNT, PETN nebo RDX. Tento otisk vzniká na základě vazeb uvnitř molekul i mezi molekulami navzájem. Terahertzová spektroskopie je považována za jednu z nejefektivnějších metod při odhalování výbušnin díky jejím unikátním vlastnostem na rozdíl od ostatních typů spektroskopie. Terahertzové vlny dokáží proniknout skrz běžně používané předměty denní potřeby, jako jsou například plasty, papír, oblečení, kůže, keramika nebo dřevo. Další velkou výhodou terahertzového záření je jeho nízká energie. Při frekvenci 1 THz dosahuje hodnoty milionkrát nižší než rentgenové záření, tím pádem nedochází k nežádoucím účinkům u biologických systémů, jelikož nemá ionizující účinky.

V praktické části bylo hlavním úkolem zjišťování vlastností výbušných látek – střelných prachů, za využití dvou spektroskopických přístrojů. Vzorky pro měření byly vytvořeny z několika druhů střelného prachu tak, aby bylo možné vzájemně porovnat získané výsledky v závislosti na druhu použité látky. Speciálním případem bylo zobrazování, při

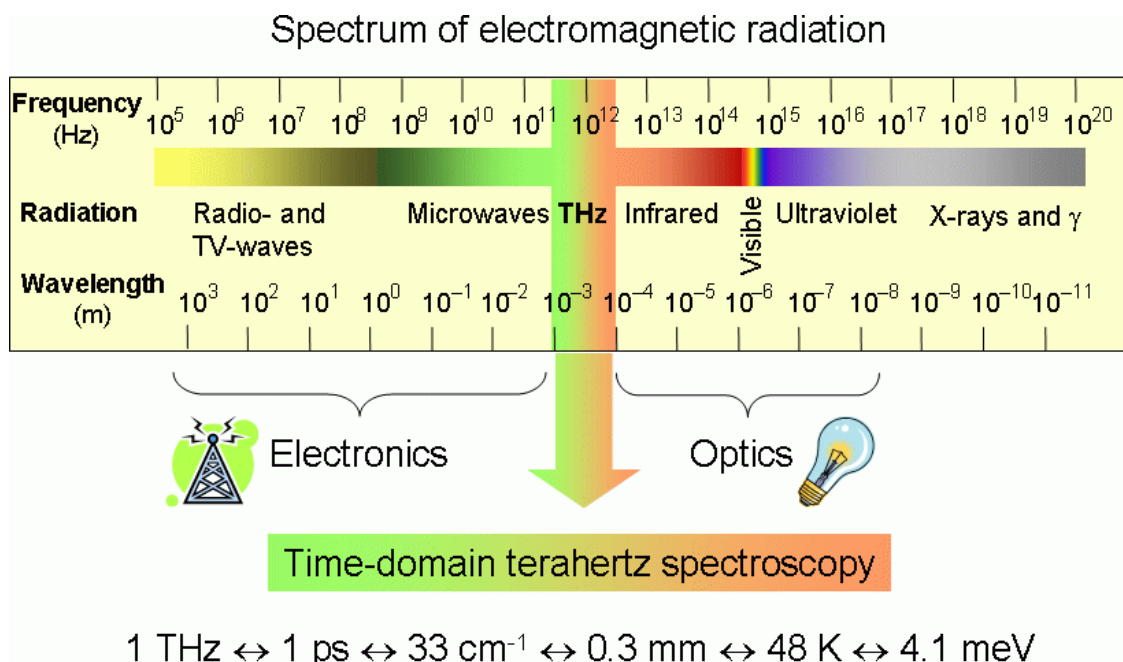
kterém na jednom vzorku bylo umístěno více druhů střelného prachu, což následně poskytovalo přímé srovnání jednotlivých střelných prachů. Veškerá data z měření byla zpracována a vyvedena do grafů. Výstup z THz zobrazování byl proveden formou snímků jednotlivých vzorků a byla provedena analýza na vybraných frekvencích.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TERAHERTZOVÉ ZÁŘENÍ

Terahertzové záření, jinými slovy označováno i jako submilimetrové vlny nebo T-paprsky, spadá do oblasti elektromagnetického spektra, které se nachází mezi mikrovlnným a infračerveným zářením. Jak již název napovídá, frekvence odpovídajícího elektromagnetického záření je v rozmezí 300 GHz až 5 THz (pro využití v bezpečnostních technologiích). Toto záření odpovídá vlnové délce v rozsahu 0,1 mm – 1 mm, přičemž průběh jedné vlny při frekvenci 1 THz trvá pouhou 1 pikosekundu (Obr. 1).

Přítomnost terahertzových vln je známa již od počátku 20. století. Nicméně větší pozornost se tomuto oboru začala věnovat až kolem roku 1990, kdy probíhaly první výzkumy po vynálezu generátorů a detektorů terahertzového záření. [9] Ve 21. století zažila tato disciplína velký rozvoj a často docházelo k novým objevům. O terahertzovém záření se mluvilo a stále mluví jako o velmi nadějně oblasti s využitím v průmyslových aplikacích, bezpečnostních technologiích, různých zobrazovacích zařízeních s využitím od medicínské techniky až po monitoring znečištění životního prostředí.



Obr. 1: Spektrum terahertzového záření. [9]

Obrázek výše nám dává možnost náhledu na celé spektrum elektromagnetického záření. Jak již bylo řečeno, pro použití v bezpečnostních aplikacích využíváme spektrum vlnových délek v rozmezí 0,1 mm – 1 mm.

1.1 Vlastnosti terahertzového záření

Pro bezpečnostní aplikace je v našem případě stěžejní terahertzová spektroskopie a zobrazování. Využití najde především v systémech prohlídek osob a zavazadel na letištích a dalších místech se zvýšenou potřebou bezpečnosti, pro vzdálené odhalování a rozpoznávání zbraní, výbušnin či jiných nebezpečných předmětů a látek ukrytých pod oděvem či v přenášeném zavazadle. Jedná se tedy o detekci a identifikaci určitých látek a předmětů.

Bezpečnostní technologie založené na terahertzovém záření využívají jeho specifické vlastnosti:

- terahertzové záření je schopno procházet skrz materiály jako je tkanina, papír, plast a dřevo. [6] V praxi to znamená možnost snímat předměty ukryté pod oblečením (využití při přímé kontrole osob, vzdáleném pozorování, kontrole zavazadel bez jejich otevírání), v krabicích, obálkách, a podobně;
- velké množství materiálů, které jsou významné z pohledu bezpečnosti, jako například výbušniny, drogy, chemické či biologické látky, vykazují jedinečnou spektrální charakteristiku pohlcení nebo odrazu záření při určitých frekvencích. Vzhledem k tomuto faktu je možné identifikovat konkrétní ukrytou látku či předmět;
- terahertzové záření není ionizující, a nepředstavuje tak riziko pro biologické systémy (na rozdíl od rentgenových paprsků). Tato vlastnost je velmi podstatná pro osobní prohlídky, kdy je prověřovaná osoba vystavena záření [8];
- vzhledem k tomu, že tekutiny výrazně absorbují THz záření, stávají se snadno identifikovatelnými. Na druhou stranu díky velkému obsahu vody v lidském těle se stávají předměty umístěné na těle kontrastními při terahertzovém zobrazování.

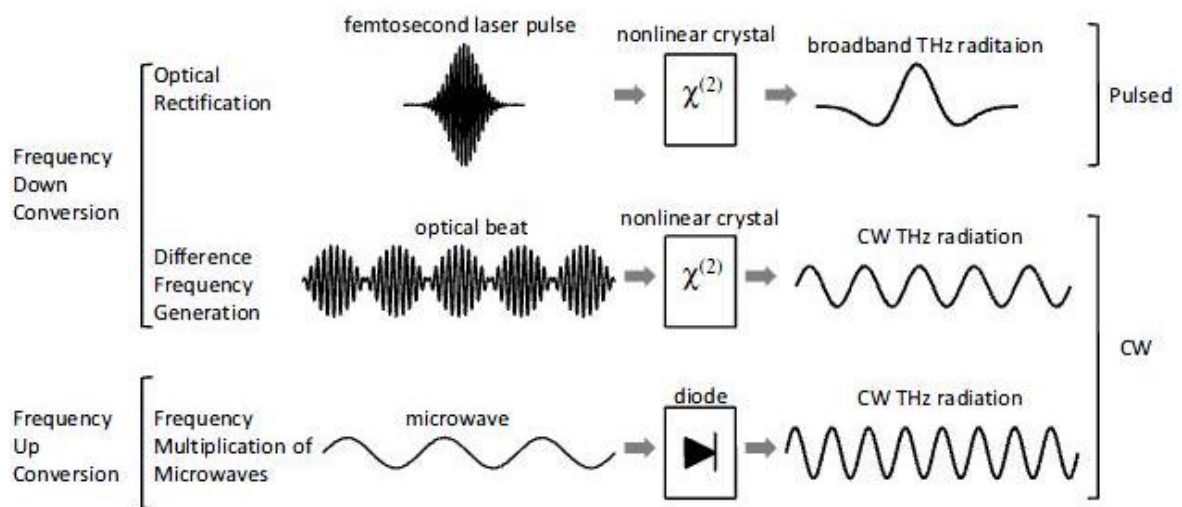
Tab. 1: Optické vlastnosti vybraných materiálů v THz spektru. [1]

Materiál	Optické vlastnosti
Voda	Vysoká absorpce záření ($\alpha \approx 250 \text{ cm}^{-1}$ při 1 THz)
Kov	Vysoká míra odrazu záření ($> 99,5\%$ při 1 THz)
Plast	Nízká absorpce záření ($\alpha < 0,5 \text{ cm}^{-1}$ při 1 THz)
	Nízký index lomu ($n \approx 1,5$)
Polovodiče	Nízká absorpce záření ($\alpha < 1 \text{ cm}^{-1}$ při 1 THz)
	Vysoký index lomu ($n \approx 3 - 4$)

1.2 Generování THz záření

Zdroje terahertzového záření využívají různé metody pro jeho generování, díky technologickým výhodám a nevýhodám jednotlivých metod vzniká mnoho typů zdrojů THz záření. Základní typy generátorů THz záření využívají buď fotonů – generování záření pomocí principů optiky, nebo elektronů. Tyto metody, napříč technologickými rozdíly, jsou však limitovány vlastnostmi použitých materiálů v samotném generátoru. Zdroje založené na využití polovodičových komponentů, jako jsou oscilátory a zesilovače, jsou limitovány časem přenosu, což má za následek fázový posun záření. Jelikož zdroje založené na generování THz záření pomocí fotonů pracují s velkou energií těchto částic, vzniká zde potřeba takový zdroj chladit. Existují však způsoby, jak zefektivnit generování THz záření. Jedním z těchto způsobů je například frekvenční konverze. Tato konverze vzniká buď zkrácením vlnové délky mikrovln, nebo naopak prodloužením vlnové délky infračerveného záření (Obr. 2). Takové zdroje zpravidla generují THz záření o výkonu v řádech mikrowatů nebo nanowatů. [2]

Často používaným způsobem pro generování THz záření o malé energetické hodnotě (frekvence okolo 0,5 THz) je působení oscilace dvou nelineárních zdrojů záření o nižších frekvencích. Nejvýhodnějším způsobem je tedy využití oscilace dvou signálů o frekvenci 20 GHz – 40 GHz. I když se v současnosti vyvíjí technologie, které by zpracovávaly vyšší frekvence, nejsou ke komerčnímu použití dostupné. Nicméně díky výhodám mikrovlnných integrovaných obvodů se dá rozsah frekvence základních signálů rozšířit až na 200 GHz.[2]



Obr. 2: Generování THz vln z různých zdrojů. [1]

THz zdroje záření mohou být realizovány i pomocí mikrovlnných technologií a různých typů diod se silně nelineární charakteristikou. Jelikož tyto typy zdrojů neposkytují dostatečné operační frekvence, největším úkolem při budoucím vývoji je vytvořit zdroj, který by byl dostatečně výkonný pro většinu potřebných aplikací. Za tímto účelem se používají různé násobiče frekvence. Například v synchrotronu nebo elektronovém laseru dochází k oscilačnímu pohybu ve střídavém magnetickém poli a výsledkem je THz záření o vyšších frekvencích. Nicméně tato zařízení jsou méně kompaktní, zpravidla jsou větších rozměrů a není tedy možné tyto zdroje nasadit do přenosných aplikací. Na druhou stranu například Smith-Purcellův emitor je rozměry daleko kompaktnější a funguje na principu šíření záření z elektronového mikroskopu podél povrchu kovové mřížky a výsledkem je podobný efekt, tedy zvýšení frekvence, jako u synchrotronu nebo elektronového laseru. [2]

Generování záření pomocí posunu mezi rozdílnými rotačními stavy jednotlivých plynů v plynovém laseru je další způsob využívající laser, jako generátor THz záření o vysoké frekvenci. Díky existenci plynů, u kterých se často mění rotační stavy, jako jsou například metanol, metyl fluorid a další, můžeme tímto typem zdroje pokrýt široké spektrum záření od zhruba 300 GHz až po frekvence vyšší než 10 THz, což je pro drtivou většinu aplikací naprosto dostatečné. Výstupní výkon u tohoto kompaktního zdroje dosahuje několika mW, na druhou stranu je pro použití v mnoha aplikacích finančně příliš nákladný. Otázku ceny a rozměrů do jisté míry vyřešil polovodičový laser, ovšem zde vyvstává problém s nutností

chlazení zdroje. Poslední dobou často komerčně využívaný princip generování THz záření spočívá v použití fotovodivých polovodičových antén. [2]

Tab. 2: Základní parametry zdrojů terahertzového záření. [2]

Typ zdroje	Frekvenční rozsah	Průměrný výstupní výkon
Frekvenční směšovač	0,3 THz – 10 THz	~ 10 nW
GaAs fotovodivá anténa	0,06 THz – 4 THz	~ 1 μ W
Oscilátor odražené vlny	0,1 THz – 1,5 THz	~ 10 mW

Samotné THz záření můžeme v bezpečnostních aplikacích využít i ke skenování předmětů a látek. Skenovat můžeme například pomocí konverze frekvence původního signálu, ovšem to vyžaduje výkonný násobič, který dokáže frekvenci zvýšit na čtyřnásobek. Vzhledem k tomu, že tyto násobiče mají nízkou efektivitu konverze v porovnání s násobiči, které frekvenci zvýší 2x – 3x, výkonnější zdroje THz záření využívají řetězce právě těchto slabších násobičů, které jsou ovšem ve výsledku efektivnější. Často se využívá GaAs Schottkyho diod. Díky použití řetězce násobičů je možné generovat záření o frekvenci až 1,2 THz a energii 75 mikrowatů při běžných podmínkách. Pokud by však byl zdroj záření chlazen na teplotu okolo 120 K, lze dosáhnout výkonu přes 250 mikrowatů a frekvence až 2,7 THz. [2] Vývoj těchto technologií je však otázkou budoucího výzkumu.

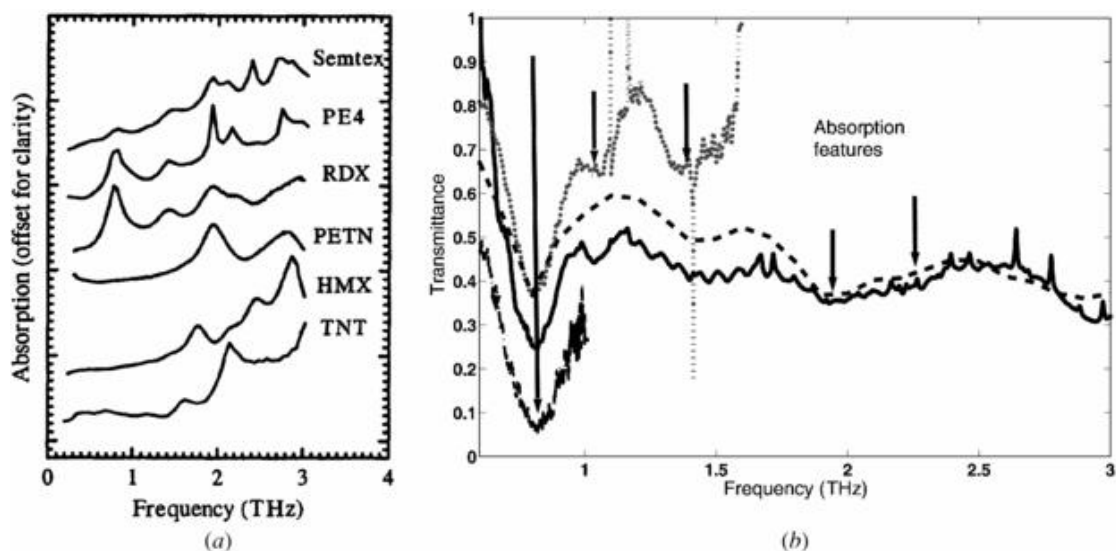
1.2.1 Fotovodivá anténa

Pro účely našeho měření budeme pracovat s typem generování THz záření, založeném na urychlování částic a časově proměnném napětí. V tomto případě je záření generováno z fotoelektricky vodivé antény pod napětím, která je ozařována laserovými paprsky v krátkých časových intervalech. Fotoelektricky vodivá anténa se skládá ze dvou kovových elektrod, které jsou naneseny na polovodičovém podkladu. Laserový optický paprsek, ozařující prostor mezi elektrodami, vytváří fotoelektricky nabitě částice a elektrické pole urychluje volné částice. Proud fotoelektricky nabitých částic se časově mění v závislosti na intenzitě dopadajícího laserového záření. Následkem tohoto jevu produkují femtosekundové pulzy širokopásmové terahertzové vlny. [1]

2 IDENTIFIKACE A ODHALOVÁNÍ VÝBUŠNIN

Nedávno vyvinuté terahertzové technologie umožňují detekci a identifikaci širokého množství materiálů. Hlavní charakteristikou terahertzového spektra je výskyt absorpčního maxima, které vzniká v důsledku stavu fononů přímo závislých na krystalové mřížce. Tyto výsledky pocházejí z vibrací molekul a intramolekulárních rotací. Vibrační stavy jsou jedinečnou a zřetelnou vlastností krystalických výbušných materiálů, jako je například RDX. [8] Přítomnost většiny charakteristických rysů dané látky může být zapříčiněna rozptylem ze struktury o rozměrech srovnatelných s velikostí terahertzové vlnové délky. Tato skutečnost se obvykle vyskytuje v materiálech obsahujících vlákna nebo zrna. Pro aplikaci v bezpečnostních technologiích je podstatné, že existuje několik charakteristických absorpčních rysů, které se projevují při frekvencích od 0,1 THz do 5 THz, což může být využito pro identifikaci konkrétní výbušniny nebo jiné nebezpečné látky.

Na základě mnoha nezávislých měření již bylo prokázáno, že stejné látky mají při určitých frekvencích shodné spektrální charakteristiky. Následující obrázek nabízí srovnání THz spektra výbušnin. Část (a) ukazuje charakteristické frekvence vybraných výbušnin v rozsahu 0,1 THz až 3 THz. Část (b) porovnává charakteristické otisky samotné výbušniny RDX (přerušovaná čára) a plastické trhaviny C-4 (horní tečkovaná čára), při jejíž výrobě bylo použito právě RDX. Ostatní křivky v grafu zobrazují spektrální odraz RDX za použití jiných metod měření (Obr. 3).



Obr. 3: Charakteristické otisky výbušnin. [9]

V obou případech byla zaznamenána charakteristická absorpce při frekvencích 0,8 THz, 1,5 THz, 2,0 THz, 2,2 THz a 3 THz. Zajímavým faktem je, že hlavní absorpční rysy RDX jsou stále přítomny, i když je RDX smícháno s materiálem, který je základním prvkem pro vytvoření plastické trhaviny C-4.

2.1 Alternativní detekce výbušnin

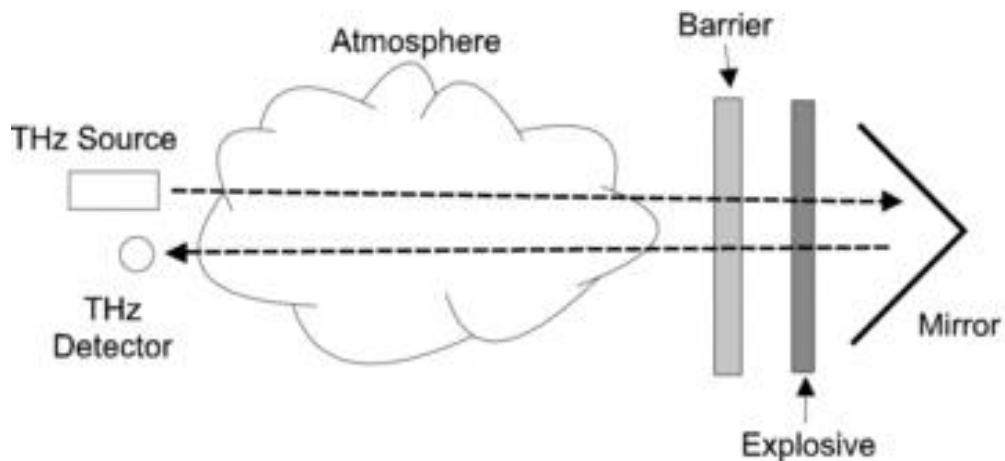
Samotná terahertzová spektroskopie nabízí spoustu výhod, na druhou stranu bude efektivně zobrazovat pouze materiály, které mají pevnou krystalickou mřížku. U amorfních látek je problém se zobrazením, jelikož nemají ostré charakteristické rysy, ale ve zkoumaném spektru pouze monotónně vzrůstají. Jednou z takových látek může být například amonium nitrát, ze kterého se dá vytvořit poměrně silná výbušnina pro improvizované nálože. Zde se nabízí možnost alternativního zkoumání spektra pomocí par, které z látky vychází.

Detektory výbušnin na bázi par a stopových množství využívají ke své funkci skutečnosti, že se látky na základě vypařování nebo sublimace uvolňují do okolního prostředí. Tento způsob detekce výbušnin je vhodný tam, kde dochází k dostatečnému uvolňování látky do okolí, což zpravidla není případ látek, které jsou čitelně zobrazeny pomocí terahertzových vln. Detektory par akceptují malé množství výparů nebo částic, které jsou zahřívány, ionizovány a následně identifikovány podle plazmagramu. [8] Tato zařízení pro analýzu látek jsou dnes plně přenosné a umožňují detekovat a rozpoznat látky již od hmotnosti okolo desítek piko-gramů testované látky. K jejich analýze vyžadují stopové množství výbušniny či drogy v plynném stavu nebo ve formě částic. Naproti tomu při použití terahertzové detekce je zapotřebí větší množství hledané látky. Terahertzová detekce tedy zatím nemůže být přímým konkurentem detektorů par, ale spíše můžeme hovořit o vhodné kombinaci těchto metod pro bezpečnostní aplikace. Detekce pomocí terahertzových vln může oproti detektorům par odhalit přenášení výbušnin či drog, které jsou dokonale zabaleny tak, že neuvolňují dostatečné množství stopových látek. Navíc terahertzová detekce je na bázi zobrazování a je okamžitě vidět konkrétní místo, kde se nachází ukryvaná látka. [8]

2.2 Metody detekce a identifikace nebezpečných látek a předmětů

Pro bezpečnostní aplikace, které můžeme nasadit pro odhalování nebezpečných látek a předmětů u osob nebo ukrytých v zavazadlech, je důležité vytvořit systém, který bude

schopný detektovat a určit konkrétní látky či předměty z bezprostřední blízkosti při osobních kontrolách (využití i při kontrole poštovních zásilek). Zároveň je ale důležité, aby bylo možné monitorovat a detekovat nebezpečné látky a předměty ukryté pod oblečením nebo například v obuvi na velkou vzdálenost. Toho využíváme zejména při sledování prostorů s velkým počtem osob, jako jsou letištní odbavovací haly, nádraží a podobně. Při detekování nebezpečných látek na větší vzdálenosti však musíme dbát na to, aby okolní prostředí nezkruslo výsledný obraz. Jelikož voda má vysokou absorpci v oblasti terahertzových vln, velkou překážkou tak může být mlha nebo jiné znečištění prostředí, ve kterém provádíme kontrolu, jako například zvířený prach a podobně. Na následujícím obrázku je znázorněno schéma detekce výbušnin na větší vzdálenost a je zde zohledněn právě vliv okolního prostředí (Obr. 4).



Obr. 4: Schéma detekce výbušnin na větší vzdálenost. [3]

Na základě požadavků na terahertzové zobrazovací zařízení je můžeme rozdělit do dvou kategorií, a to buď podle vzdálenosti, ze které pořizujeme snímek, nebo podle principu detekce.

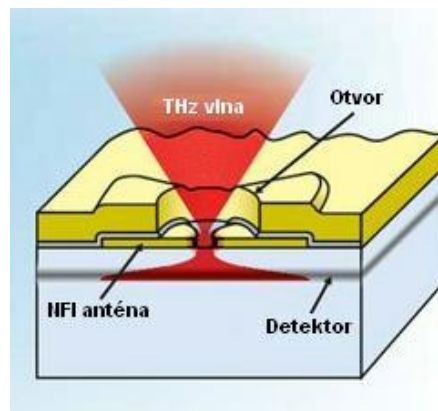
Vzdálenost:

- zobrazování ze vzdáleného místa
- zobrazování z bezprostřední vzdálenosti

Princip detekce:

- aktivní
- pasivní

Pasivní zobrazovací systémy jsou založeny na skutečnosti, že každý objekt vydává určité množství terahertzového záření a toto záření pouze snímá. Moderní zařízení dokáží detekovat předměty až na vzdálenost 25 m. Oproti tomu aktivní zobrazovací systémy mají vlastní zdroj záření, které se vyzařuje do prostoru, a následně pak zpracovávají odraz tohoto záření. Výhodou těchto systémů je větší intenzita záření, nicméně dlouhou dobu byl problém sestavit dostatečně silný zdroj záření za tímto účelem.



Obr. 5: Terahertzový detektor. [11]

Pro terahertzové zobrazování se zpravidla využívá generování a detekce buď pulzním laserem, nebo pomocí zařízení spojitě rozdílové frekvence. Pulzní zdroje se častěji používají v případech detekce z bezprostřední blízkosti, jelikož jsou schopny rozpoznat a získat informace o hloubce. Výhodou tohoto typu časově závislé spektroskopie je, že poměrně obsáhlá spektrální informace v rozmezí 0,1 THz až 3 THz, která může být získána během jediného terahertzového pulzu, trvajícím v průměru pouhou pikosekundu, stejně jako informace o hloubce, která je sestavena z rozdílu v čase příchozích krátkých pulzů.

Spojitě systémy zobrazování mají výhodu ve vysokém terahertzovém výkonu při různých frekvencích. Další výhodou spojitě terahertzové spektroskopie, oproti pulzní časově závislé spektroskopii je, že úzké spektrální charakteristiky je jednodušší měřit za použití spojitých metod, kvůli spektrálně úzkému spojitému terahertzovému záření, a kvůli postrádání dlouhé snímací zpoždovací linie, která je vyžadována pro vysoké spektrální rozlišení v časově závislém systému. [8]

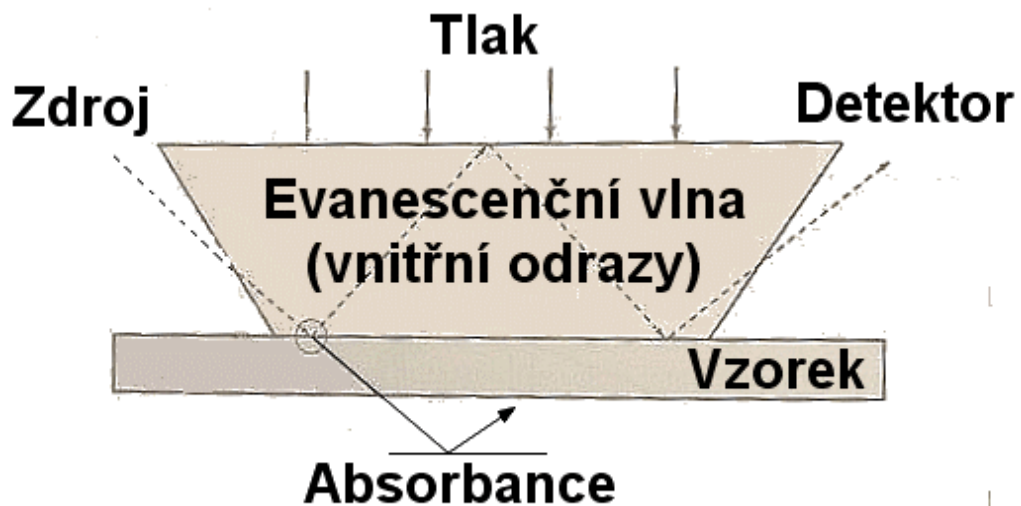
Při detekci na větší vzdálenosti je hlavním faktorem pro rozhodnutí mezi krátkým pulzním zdrojem nebo spojitým zdrojem potřeba šíření záření atmosférou. Pro aplikace vzdálené detekce je vhodných pouze několik pásem terahertzových frekvencí. Pro terahertzové časově závislé pulzy, které jsou generovány laserovými systémy krátkých pulzů, se terahertzové spektrum pulzů rozprostírá přes několik přenosových pásem. Nicméně výkon terahertzového záření, který je mimo tato přenosová pásma, je z větší části pohlcován. [8] V důsledku tohoto faktu bude množství užitečného výkonu v pulzu dramaticky sníženo. Pro šíření terahertzových pulzů skrz 2,4 m vlhkého prostředí je pulz, který v běžných podmínkách trvá 1 ps, rozšířen na dobu 30 ps. Na vzdálenosti 100 m je čas pulzu výrazně větší než 100 ps.

Pro bezpečnostní aplikace využívající terahertzové záření je největší výzvou právě vzdálená detekce. S narůstající vzdáleností musíme brát v potaz uvažovanou vlhkost atmosféry, prach, kouř a podobně, jakožto možné překážky při detekci. Měření pikosekundových pulzů při větších vzdálenostech začíná být problematické. V případě, že chceme překonat ztráty pohlcením překážkami a atmosférickými vlivy, je nutné vyvinout výkonnější zdroje a ve spojení s tím kompatibilní terahertzové přijímače s malým vlivem okolních šumů. [10]

2.2.1 ATR spektroskopická metoda – „metoda zeslabeného celkového odrazu“

Jedná se o moderní metodu spadající do infračervené, ale i terahertzové spektroskopie, která se používá u látek s vysokou absorpcí záření, jako jsou tekutiny, pasty, gely, ale i některé prášky. Metoda ATR se používá především v případech, kdy zkoumáme povrch daného materiálu. Principem této metody je vnitřní odraz (reflexe) terahertzového záření při průchodu ATR krystalem – optického hranolu, s velkým indexem lomu (Obr. 6). Jako hranoly se nejčastěji používají upravené diamanty, germanium, křemík, ZnS, ThBr nebo ZnSe. [13] Tyto materiály mají vyšší index lomu než okolní prostředí, proto u nich dochází k úplnému odrazu. Pokud umístíme vzorek do těsného kontaktu s ATR krystalem, na rozhraní opticky hustšího prostředí (ATR krystal) a opticky řidšího prostředí (zkoumaný vzorek) vznikne zeslabující se absorpční vlna, která se vzdáleností od rozhraní (řádově mikrometry) exponenciálně klesá. Abychom tomuto jevu předcházeli, vytvoříme na hranol určitý tlak, kterým zajistíme lepší kontakt hranolu se vzorkem.[13] Měření pomocí ATR metody ovšem ovlivňuje několik faktorů:

- vlnová délka THz záření – ovlivňuje hloubku průniku záření,
- index lomu krystalu – nutné dodržet, aby úhel dopadu záření byl menší nebo roven meznímu úhlu,
- tvar krystalu – ovlivňuje průchod paprsku a počet odrazů,
- materiál krystalu – ovlivňuje index lomu a spektrum propustnosti THz záření,
- úhel dopadu – má vliv na počet odrazů v krystalu a hloubku průniku,
- kontakt vzorku s krystalem – tuto podmínku nejlépe splňují kapalné a plastické materiály,
- hloubka průniku záření. [14]

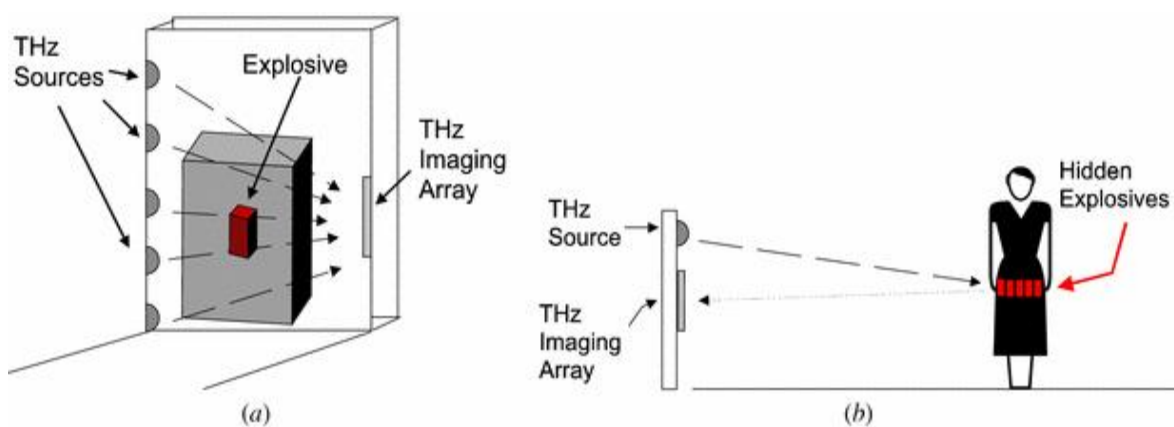


Obr. 6: Absorpce THz záření vzorkem. [13]

2.3 Princip detekce a identifikace nebezpečných látek a předmětů

Následující schéma (Obr. 7) popisuje dva možné způsoby využití spektroskopie při kontrole přítomnosti nebezpečných látek. Transmisní (průchozí) metoda a odrazová metoda. V prvním případě (a) je použitý způsob, kdy vysílané záření vychází z několika zdrojů a prochází skrz materiál. Následně dopadá na přijímač, který vytvoří obraz. V druhém případě (b) vychází záření pouze z jednoho zdroje a dopadá na přijímač na základě odrazu od zjišťovaného materiálu. V obou případech dochází k ozáření kontrolované osoby nebo předmětu, avšak každá metoda se používá v jiných případech.

Vzhledem k tomu, že výbušné materiály silně absorbují terahertzové záření, transmisní metoda je efektivní při detekci velmi malého množství hledané látky – například plátek výbušniny RDX o síle 0,1 mm nebo drogy v množství okolo 20 mg. Pokud budou materiály ve větším množství, vzhledem k jejich absorpčním schopnostem, se při této metodě stanou neprůhledné. V této situaci bude výhodnější použití odrazové metody. Ta funguje tak, že záření ze zdroje pronikne oblečením, odrazí se od detekované látky, zpět pronikne oblečením a následně se zobrazí na přijímači.



Obr. 7: Schéma principu detekce na blízku a na dálku. [3]

Schopnost terahertzového záření reagovat s různými materiály je podstatou bezpečnostních technologií založených na spektroskopii. Obecně lze říci, že materiály denní potřeby v pevném skupenství, jako jsou plasty nebo keramika, jsou průhledné (záření jimi pronikne) při frekvencích od 0,5 THz do 2,5 THz. Záření je schopno proniknout i kapalinami, ale dochází zde k jejich vysoké absorpci. To je způsobeno rotačními pohyby molekul, jelikož látky v kapalném stavu nemají pevnou krystalickou mřížku. Pevnou látkou tedy záření proniká podstatně lépe, jelikož zde nedochází k tak výrazným rotacím, na druhou stranu může docházet k rezonanci fononů v oblasti terahertzového záření, což následně ovlivňuje zobrazování.

V tabulce jsou uvedeny frekvence záření, při kterých se nejvíce projevují charakteristické spektroskopické vlastnosti vybraných látek. Jedná se o látky výbušné, drogy nebo materiály, ve kterých se často někdo tyto látky pokouší ukrýt. Jak již měření prokázala,

například v případě s výbušninou RDX, vlastnosti většiny látek se projeví, i když se smíchají s jiným materiálem. Proto je možné stejně tak odhalit drogy na základě specifického otisku i po ukrytí do maskovacího materiálu.

Tab. 3: Střední hodnoty charakteristických frekvencí vybraných výbušnin. [3]

Materiál	Střední hodnota charakteristických frekvencí [THz]
Výbušniny:	
Semtex-H	0,72; 1,29; 1,73; 1,88; 2,15; 2,45; 2,57
RDX / C4	0,72; 1,26; 1,73
PE4	0,72; 1,29; 1,73; 1,94; 2,21; 2,48; 2,69
TNT	5,6; 8,2; 9,1; 9,9
Drogy:	
Metamfetamin	1,2; 1,7-1,8
Aspirin tableta	1,4; 2,24
Moučkový cukr	1,44; 1,61; 1,82; 2,24; 2,57; 2,84; 3,44
MDMA (extáze)	1,4; 1,8

3 MOŽNÉ ZDRAVOTNÍ RIZIKO POUŽITÍ TERAHERTZOVÝCH VLN

Od terahertzových vln, jakožto nástroje pro bezpečnostní aplikace, se očekává velký přínos. Terahertzové vlny prochází nevodivými materiály jako oblečení, papír, dřevo a cihly, a tak detektory citlivé na tyto vlny mohou pronikat do obálek, zavazadel, či zjišťovat přítomnost různých nebezpečných předmětů u osob. Způsob, jakým jsou terahertzové vlny absorbovány a emitovány, lze také použít k určení chemického složení materiálu. Navíc i navzdory faktu, že neprostupují příliš hluboko do těla, vkládají se velké naděje do možnosti, že tyto vlny lze použít na detekci nádorů blízko povrchu pokožky. Díky celému tomuto potenciálu zaznamenal výzkum terahertzových vln za období posledních deseti let velký rozvoj.

Otázkou ovšem zůstává, jestli při použití terahertzových vln nehrozí zdravotní riziko pro biologické systémy. Na první pohled je jednoduché zavrhnout jakoukoliv možnost, že hrozí zdravotní rizika, jelikož terahertzové fotony nemají dostatečnou energii, aby rozbily chemické vazby nebo zionizovaly atomy či molekuly, což jsou hlavní důvody, proč jsou fotony o vyšších energiích, jako například rentgenové a UV záření, pro lidský organismus tak škodlivé. Avšak důkazy, že terahertzové záření poškozuje biologické systémy, jsou smíšené. Některé studie a výzkumy například uvedly výrazné genetické poškození, zatímco jiné výzkumy, ačkoliv byly založené na podobné bázi, nevykázaly žádné poškození. [12]

V současnosti vytvořila skupina vědců model pro výzkum, jak terahertzová pole reagují s dvojitou šroubovicí DNA. Tvrdí, že ačkoliv síly vytvářené zářením jsou malé, rezonanční efekty terahertzových vln jsou schopny rozpojit dvojitou šroubovicí DNA a vytvořit v tomto spojení vzduchové bubliny, které mohou výrazně ovlivňovat procesy, jako genová exprese a množení/replikace DNA. Normální rezonanční efekty nejsou dost silné na to, aby způsobily tento druh poškození, ale mohou vzniknout v důsledku nelineární rezonance. Tyto nelineární nestability se vytváří s mnohem menší pravděpodobností, což stává škodlivý vliv terahertzových vln spíše do teoretické roviny. Terahertzové vlny jsou samozřejmě přirozenou součástí prostředí, stejně jako viditelné a infračervené světlo. Ale nová generace bezpečnostních aplikací založených na tomto principu je upravena tak, aby nejen zaznamenávaly terahertzové vlny, ale také je emitovaly a vystavovaly nás tak

zvýšené expozici těchto vln. A pokud se naše expozice má zvýšit, otázkou zůstává, jak vysoká úroveň expozice terahertzovým vlnám je pro biologické systémy bezpečná. [12]

Terahertzové elektromagnetické záření pokládáme za neškodné, protože neobsahuje tolik energie, jako například rentgenové, aby mohlo narušit chemické vazby. Nicméně poslední výzkumy ukazují, že řetězce DNA vibrují právě při frekvencích 0,3 THz – 3 THz, které se využívají v bezpečnostních aplikacích. To je možné jen díky jejich velikosti, jelikož vibrace molekul se normálně odehrávají pouze při mnohem vyšších frekvencích odpovídajících infračervenému záření. Ozáření DNA terahertzovými vlnami tak může vést k oddělení jejích řetězců, popřípadě i k jejich rozlomení. Na druhou stranu tohoto faktu bude možné využít k ozařování nádorů, během kterého bude selektivně zničena jejich DNA, aniž by byly poškozeny ostatní buňky.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 PŘÍPRAVA VZORKŮ

Prvním krokem před samotným měřením byla příprava vzorků střelných prachů. K dispozici byly tyto vybrané druhy:

- Vectan
- PB Clermont
- Brokový nábojový prach
- Accurate
- MDN-9
- VIHTAUORI-N530
- S035-1

K těmto střelným prachům byl pro porovnání připraven ještě vzorek cukru, polyethylenu (LDPE) a grafitu. Jednotlivé vzorky pak byly v tenké vrstvě nanесeny na podklad, který tvořil v jednom případě papír, ve druhém případě lepicí páska. Vzorky bylo důležité nanést ve správné vrstvě tak, aby nedocházelo k úplnému pohlcení THz záření. Takto připravené vzorky byly použity pro spektrální analýzu i pro metodu skenování - THz zobrazování. Pro tuto metodu byly také připraveny vzorky, které vedle sebe obsahovaly několik druhů střelných prachů a ostatních látek, aby bylo možné přímé porovnání rozdílného zobrazení těchto látek. Pro metodu ATR spektroskopie nebylo třeba sypké vzorky dále zpracovávat, jelikož tato metoda nevyžaduje žádnou speciální přípravu.



Vzorek 1 obsahuje tyto materiály:

- vlevo nahoře brokový nábojový prach
- vpravo nahoře MDN-9
- vlevo dole Accurate
- vpravo dole LDPE

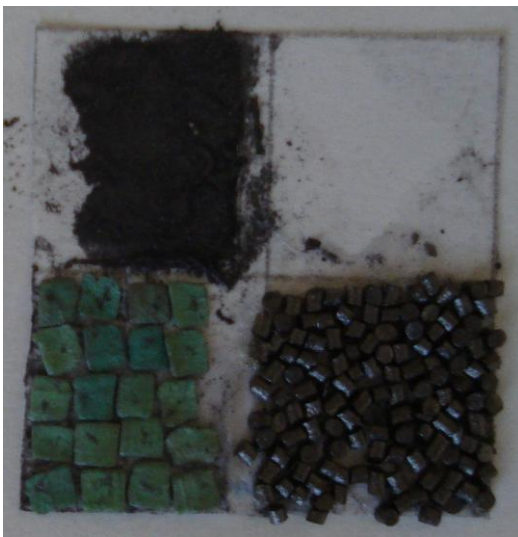
Obr. 8: Vzorek 1 pro THz zobrazování.



Vzorek 2 obsahuje tyto materiály:

- vlevo nahoře cukr
- vpravo nahoře S035-1
- vlevo dole PB Clermont

Obr. 9: Vzorek 2 pro THz zobrazování.



Vzorek 3 obsahuje tyto materiály:

- vlevo nahoře grafit
- vlevo dole Vectan
- vpravo dole VIHTAUORI-N530

Obr. 10: Vzorek 3 pro THz zobrazování.

Kromě přípravy vzorků pro THz zobrazování byly připraveny také samostatné vzorky střelných prachů a ostatních látek pro THz analýzu. V prvním případě byl podkladovým materiálem papír (Obr. 11), ve druhém případě byla použita lepicí páska (Obr. 12). V obou případech byly použity stejné druhy střelných prachů.

Vzorky s papírovým podkladem (Obr. 11) jsou v pořadí:

- vlevo od horního okraje PB Clermont, brokový nábojový prach a Accurate;
- vpravo od horního okraje MDN-9, Vectan a S035-1;
- dole uprostřed VIHTAUORI-N530.



Obr. 11: Vzorky střelných prachů – podklad papír.

Vzorky s podkladem z lepicí pásky (Obr. 12) jsou v pořadí:

- vlevo od horního okraje Accurate, Vectan, brokový nábojový prach, MDN-9, cukr;
- vpravo od horního okraje VIHTAUORI-N530, PB Clermont, S035-1.



Obr. 12: Vzorky látek pro měření – podklad lepicí páska.

5 MĚŘENÍ

5.1 TPS Spectra 3000

K měření byl použit přístroj TPS Spectra 3000 od britské firmy TeraView Ltd., který je prvním komerčním zařízením, které umožňuje provést jak spektroskopický rozbor, tak i THz zobrazení zkoumané látky. Zařízení pracuje s frekvencemi v rozmezí 60 GHz až 4 THz a na rozdíl od řady ostatních přístrojů nevyžaduje chlazení zkapalněným heliem nebo vakuovým systémem. Nicméně možnost vytvoření vakua v pracovním prostoru byla využita z důvodu dosažení přesnějších hodnot při měření, jelikož v tomto případě nedochází ke zkreslení signálu při průchodu THz záření vzduchem s vodními parami.

Při měření byly využity tři způsoby měření. První z nich byl tzv. rapid-scan režim transmisní spektroskopie, který v podstatě zobrazuje spektrální charakteristiku zkoumané látky v reálném čase. Při tomto režimu je vzorek snímán 30 krát za sekundu při rozlišení 32 GHz. [5]

Druhým způsobem je tzv. skenovací režim odrazného zobrazování, pomocí kterého vznikne obraz zkoumané látky. V tomto případě čas měření závisí na požadovaném rozlišení, přičemž nejvyšší rozlišení, které můžeme získat, je 7,5 GHz. Abychom získali kvalitní obraz látky nehledě na rozlišení, musí být pracovní pole redukováno, ideálně na otvor o průměru cca 3 cm. Tím dosáhneme soustředění záření do požadovaného prostoru a nebude tak docházet ke ztrátám signálu.

Posledním způsobem měření byla ATR spektroskopie, kdy bylo využito ATR modulu s krystalem křemíku. Výsledkem tohoto způsobu jsou ATR spektra mající podobnou charakteristiku jako spektra získané předchozími metodami. Výhodou ATR spektroskopie je jednoduchá příprava vzorků (prakticky žádná), pouze se nasypou na krystal a zaaretují. Nevýhodou této metody však jsou méně kvalitní spektra.



Obr. 13: Přístroj TPS Spectra 3000. [7]

5.2 Tera OSCAT

Přístroj Tera OSCAT (Optical Sampling by Cavity Tuning), od německé společnosti Menlo Systems GmbH., využívá dvou fotovodivých antén – jedna slouží jako vysílač, druhá jako přijímač. Fotovodivá anténa vysílače je ozařována laserovými paprsky v krátkých časových intervalech a generuje tak širokopásmové THz vlny. Tyto vlny pak prochází optickou soustavou až k samotnému vzorku, který je umístěn uprostřed mezi anténami. Vlny následně dopadají na přijímač, ve kterém se na základě přijímaných pulzů generuje napětí, které je převedeno do číselné podoby. Systém Tera OSCAT, který je moderním spektroskopickým systémem, se od ostatních systémů odlišuje především jedinečnou konstrukcí optického časového zpoždění, kdy je toto vytvářeno nikoli pomocí mechanického pohybu optických prvků, jako jsou čočky a zrcadla, ale pomocí změn rychlosti opakování pulzů.

Při měření na systému Tera OSCAT byla využita pouze metoda transmisní spektroskopie v režimu step-scan, kdy byly jednotlivé vzorky naměřeny s rozlišením 18,3 GHz.



Obr. 14: Systém Tera OSCAT.

5.3 Průběh měření

U měření na přístroji Tera OSCAT muselo nejdříve dojít k jeho kalibraci. Po kalibraci byly nastaveny hodnoty měření, jako jsou frekvence snímání a rozsah THz spektra. Poté byla naměřena referenční hodnota – průchod THz záření vzduchem. Následně bylo přistoupeno k měření jednotlivých vzorků. Ty byly postupně umísťovány do pracovního prostoru přístroje a aretovány svorkami. Software přístroje naměřené hodnoty převedl do číselné podoby a uložil pro další zpracování.

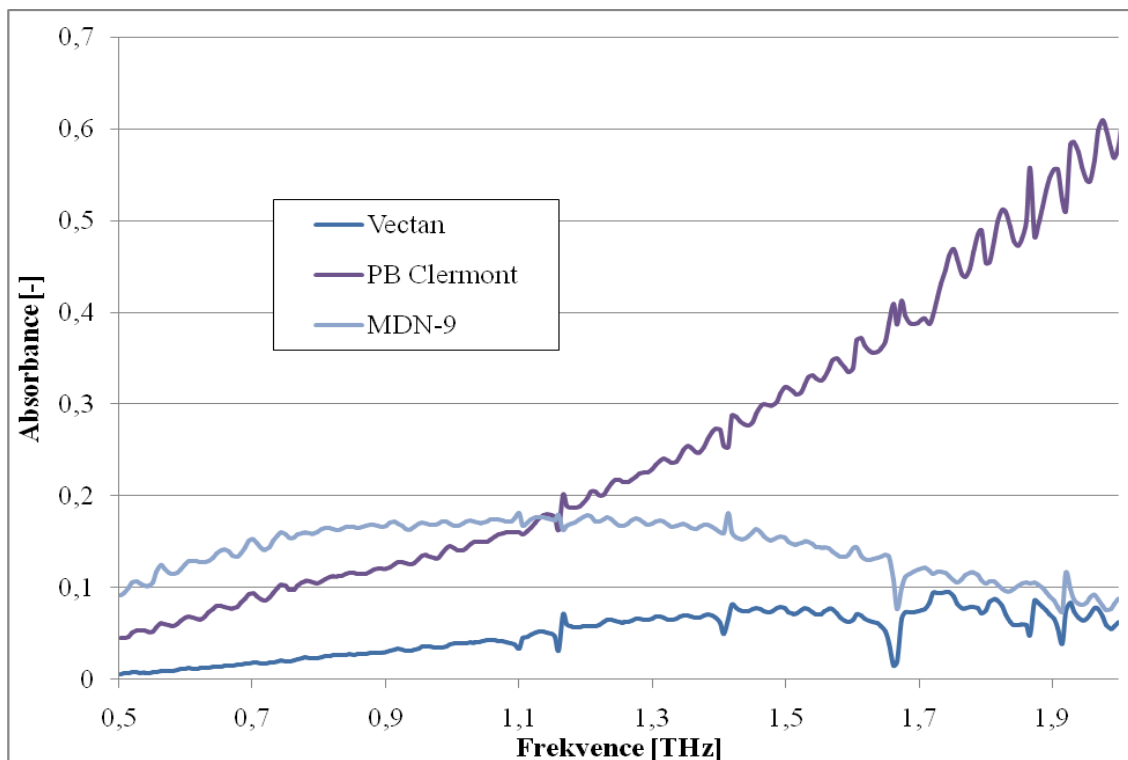
Obdobným způsobem bylo postupováno i při měření na přístroji TPS Spectra 3000. Ovšem zde bylo pro dosažení přesnějších hodnot využito možnosti vytvořit v pracovním prostoru přístroje vakuum. Po proměření všech vzorků byl přidán k přístroji modul, který umožnil provést analýzu pomocí ATR metodou. Jak již bylo popsáno v teoretické části, jedná se o metodu, při které je využíváno odrazu THz záření v ATR krystalu, na kterém je umístěn samotný vzorek. Před každým měřením byla tedy na krystal nasypána daná látka a pomocí aretace se závitem vytvořen tlak, kterým bylo dosaženo lepšího kontaktu látky s krystalem. Tato metoda ovšem v podmínkách laboratoře nebyla tak přesná, jako předchozí způsoby měření. Poslední metodou bylo skenování, tedy zobrazení dané látky. Za tímto účelem muselo opět dojít k výměně modulu přístroje.

6 VÝSLEDKY

V následující kapitole jsou popsány veškeré výsledky měření. Výsledky byly rozděleny do tří částí, podle metody měření. První část se zabývá ATR spektroskopií.

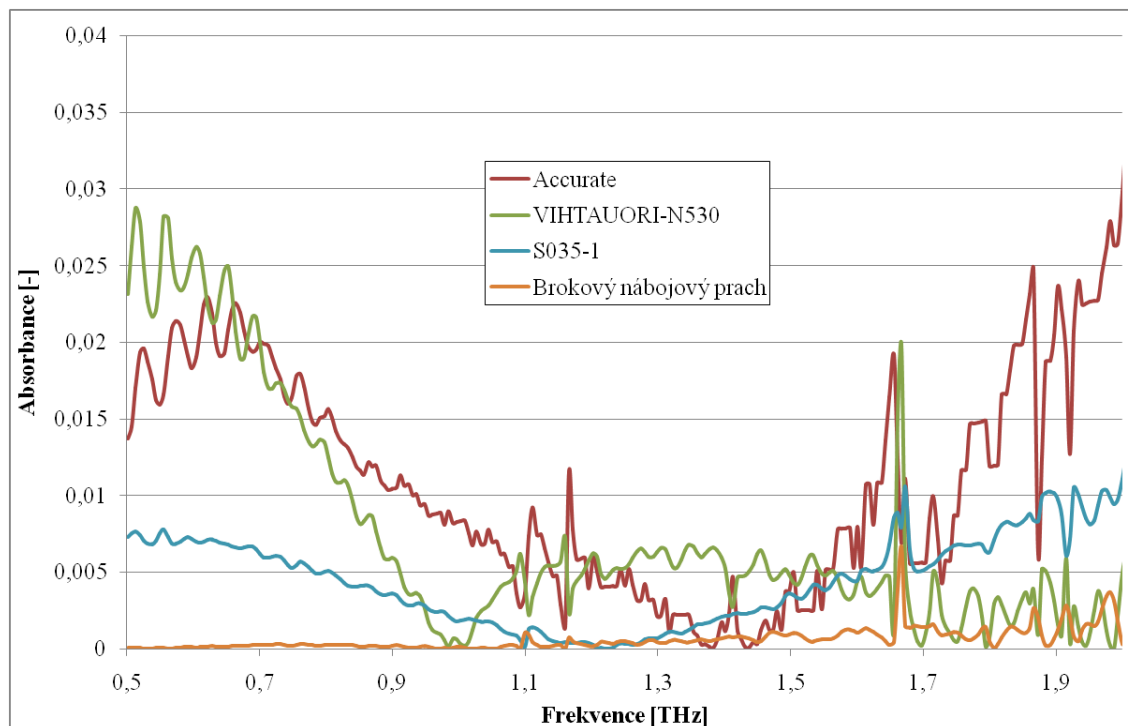
6.1 ATR Spektroskopie

Byla naměřena ATR spektra všech sedmi vzorků, při čemž absorpční spektra jsou uvedena v Obr. 10 a Obr. 11. Frekvenční rozsah pro měření ATR spektroskopií byl zvolen na 0,5 THz až 2,0 THz. U vzorků střelného prachu Vecta, PB Clermont a MDN 09 (Obr. 10) se podařilo naměřit potřebná data pro výpočet absorpčního spektra. U dalších čtyř uvedených se sice podařilo vytvořit graf absorpčních spekter (Obr. 11), ale tato nelze považovat za relevantní, jelikož hodnoty absorpance jsou příliš nízké. Důvodem, proč se nepodařilo naměřit data u posledních čtyř vzorků správně, byl nedostatečný kontakt vzorku s krystalem při měření pomocí ATR modulu. Tento nedostatek se odvíjí od velikosti zrn měřeného střelného prachu. V rámci transmisní spektroskopie tento problém odpadá, ale je nutná náročnější příprava vzorků.



Obr. 15: Absorpční spektra vybraných střelných prachů ATR.

První uvedená ATR spektra značí, že jednotlivé vzorky střelných prachů lze od sebe jednoznačně odlišit podle hodnot absorbance v určitých frekvencích či podle tvaru příslušných křivek. Ani jeden vzorek střelného prachu nevykazuje specifický spektrální otisk (frekvence, na kterých by byla ostrá minima či maxima absorbance).



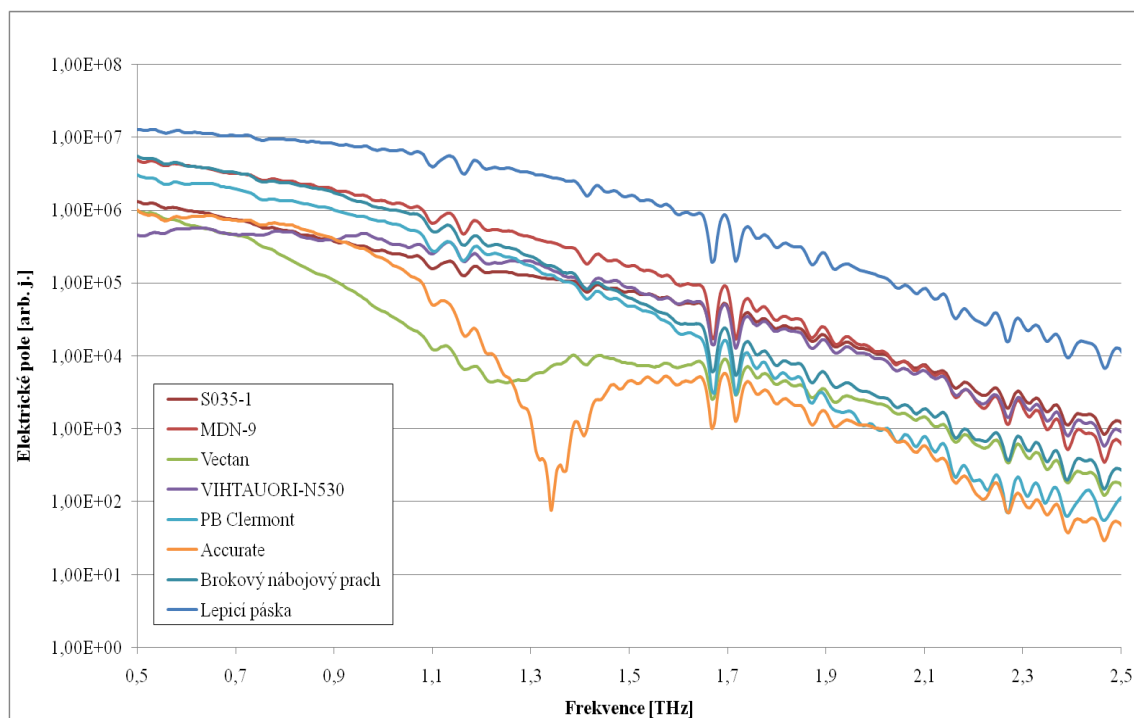
Obr. 16: Absorpční spektra ostatních střelných prachů – ATR.

Druhý graf absorpčních ATR spekter je sice uveden, ale údaje v něm uvedené nelze považovat za směrodatné z výše uvedených důvodů (hodnoty absorbance jsou příliš nízké). Rozdíly mezi jednotlivými spektry nejsou významné a jsou spíše výsledkem šumu.

6.2 Transmisní spektroskopie

Pro zkvalitnění výsledků diplomové práce byla měřena data na dvou přístrojích, při čemž je možno výsledky obou měření vzájemně porovnat a ověřit tak vyvozené závěry. V kapitole pojednávající o měření byly zmíněny rozdíly mezi oběma přístroji. Měření na systému TPS Spectra 3000 probíhala ve vakuu v pracovním prostoru přístroje, čímž byl snížen tlak a především odstraněny vodní páry, kdežto u Tera OSCAT probíhala všechna měření při běžných podmínkách (atmosférický tlak, normální relativní vzdušná vlhkost a teplota).

Jako první jsou uvedena výsledná data ze systému TPS Spectra 3000. Software TPS Spectra 3000 umožňuje export vypočítané absorbance (resp. absorpčních spekter) materiálu. Mimo absorpční spektra jsou uvedena také frekvenční spektra.

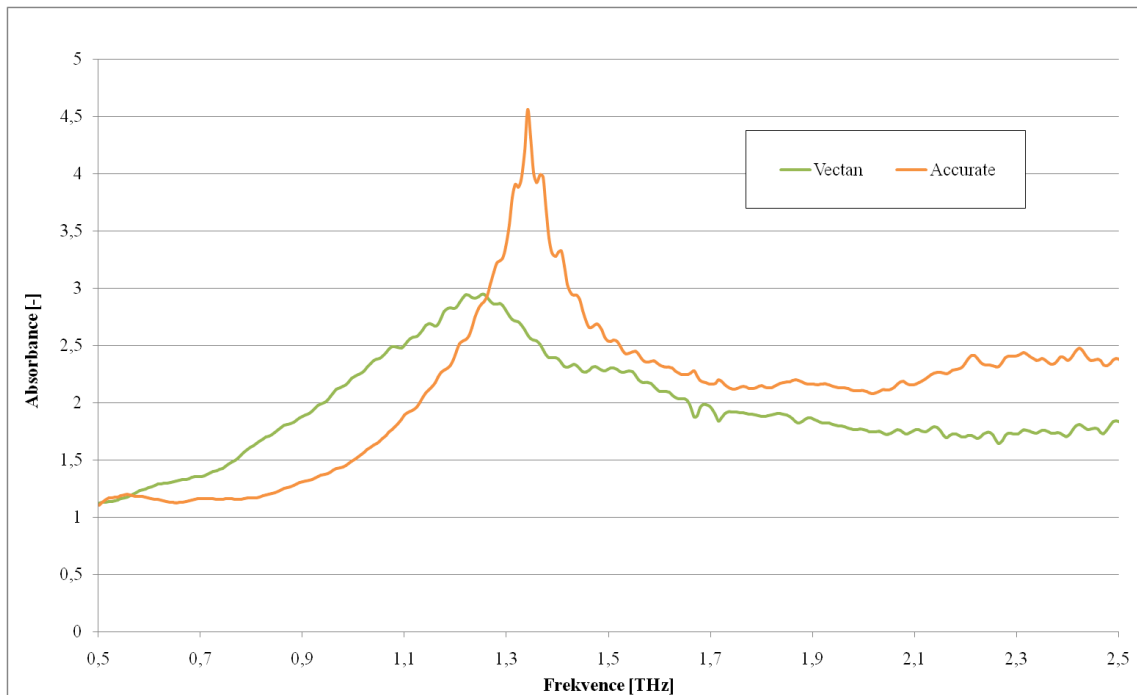


Obr. 17: Frekvenční spektra vybraných vzorků – TPS Spectra 3000.

Při pohledu na frekvenční spektra jsou mezi jednotlivými vzorky střelných prachů viditelné rozdíly, ale pro lepší rozlišení je třeba zkoumat absorpční spektra uvedená dále. Z frekvenčních spekter lze vyčíst, že jediné dva střelné prachy s charakteristickým spektrálním otiskem ve frekvenčním spektru jsou vzorky střelného prachu Vectan a Accurate. Tyto dva prachy mají minimum v oblasti přibližně 1,3 THz, při čemž vzorek Accurate má ostré minimum na frekvenci 1,34 THz. Ostatní prachy nemají žádná minima, ani maxima, která by je charakterizovala. V uvedeném grafu je také linie reprezentující frekvenční spektrum lepicí pásky, která byla použita jako základní vrstva pro vytvoření vzorků. Jak je vidět na uvedeném grafu, použitá lepicí páska nemá žádné lokální extrémny a je tedy vhodná pro použití v terahertzové oblasti spektra jakožto netečné médium.

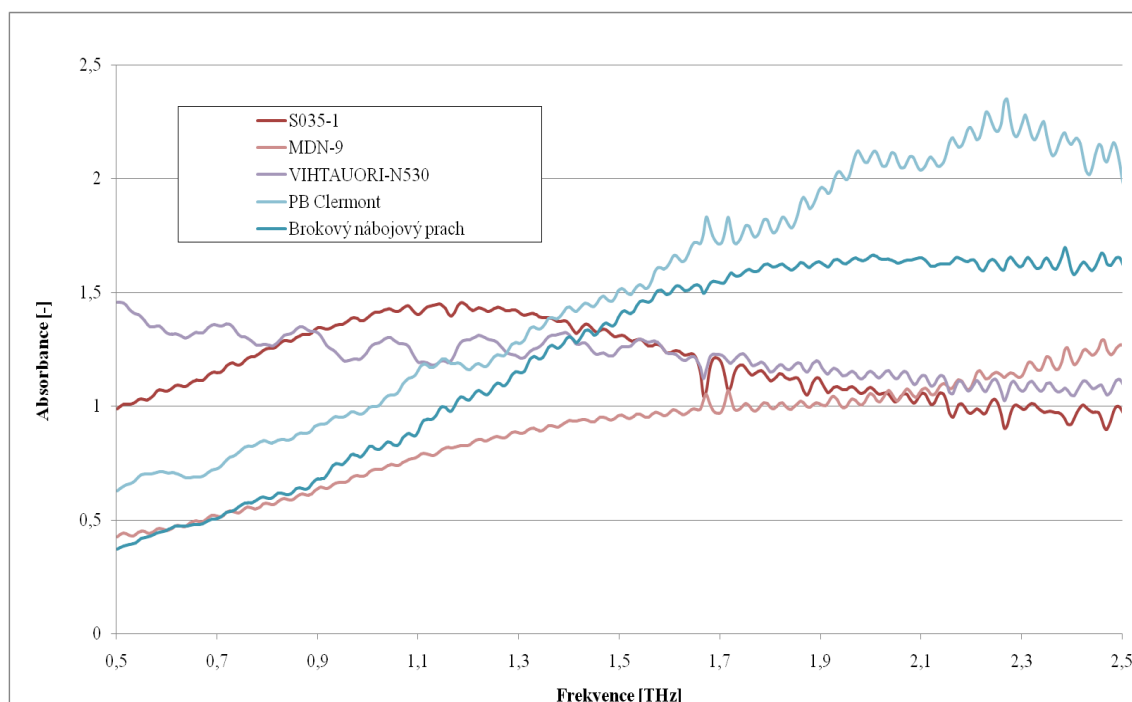
Minima na frekvencích 1,67 THz, 1,72 THz jsou způsobena zbytkovou vlhkostí v pracovním prostoru přístroje, kterou se nepodařilo odstranit pomocí vakua.

Pro lepší čitelnost dat byla absorpční spektra rozdělena do dvou grafů, v prvním jsou uvedeny pouze absorpční spektra vzorků Vectan a Accurate. V druhém jsou pak zbylé vzorky. Měřítko osy Y je odlišné, ale jednotky jsou stejné, takže lze hodnoty navzájem porovnávat.



Obr. 18: Absorpční spektra střelných prachů Vectan a Accurate.

Absorpční spektrum vzorku Accurate ještě více zvyrazňuje silnou absorpci THz záření na frekvenci 1,34 THz. Tato vlastnost odlišuje vzorek střelného prachu Accurate od všech ostatních, a proto není třeba dále jeho absorpční spektrum diskutovat. Podobně je na tom i vzorek střelného prachu Vectan, s absorpčním maximem na frekvenci 1,22 THz. U obou vzorků lze pozorovat odlišný průběh absorpčního spektra, kdy některé oblasti klesají či stoupají strměji a mírněji.



Obr. 19: Absorpční spektra ostatních střelných prachů.

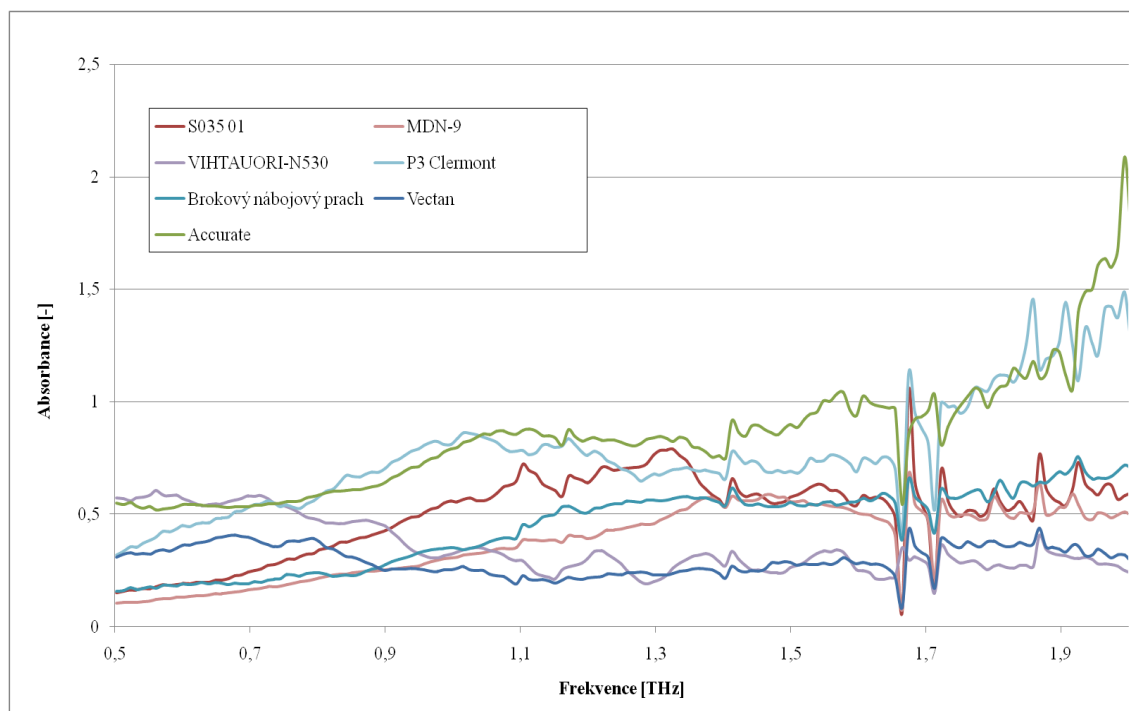
Zbýlých pět vzorků střelných prachů je již třeba podrobit dalšímu rozboru. Od ostatních látek (jako jsou obalové materiály či neškodné látky) a také od sebe navzájem je možné tyto vzorky odlišit pomocí tvaru absorpčního spektra. Z grafu je patrné, že střelné látky MDN-9 a brokový nábojový prach mají v rozmezí 0,5 THz – 1 THz velice podobnou charakteristiku, ovšem při vyšších frekvencích se jejich charakteristiky výrazně rozcházejí, brokový nábojový prach lépe absorbuje vyšší frekvence, a je možné je od sebe vzájemně odlišit. Střelný prach PB Clermont vykazuje vyšší absorpci při vyšších frekvencích, při čemž maxima dosahuje v intervalu 2,1 THz – 2,5 THz. Střelné prachy VIHTAUORI-N530 a S035-1 se od ostatních liší vyšší absorpcí v rozmezí 0,5 THz – 1,2 THz, při vyšších frekvencích mají jejich křivky podobný průběh jako u MDN-9 a je prakticky nemožné od sebe jednotlivé druhy odlišit.

Další data pocházejí z měření provedeného na přístroji Tera OSCAT. Software přístroje Tera OSCAT neumožňuje přímý výpočet a export absorbance pro zobrazení absorpčních spekter materiálů, proto bylo třeba naměřená data zpracovat a výsledná spektra vypočítat.

Pro výpočet absorbance se používá vzorec

$$A = -\log\left(\frac{I}{I_0}\right),$$

kde A je požadovaná absorbance, I je intenzita THz záření, které prošlo měřeným vzorkem a I_0 je referenční intenzita záření bez přítomného vzorku.



Obr. 20: Absorpční spektra střelných prachů – Tera OSCAT.

Z výsledku uvedeného na Obr. 20 vyplývá, že absorpční spektra jsou sice rozdílná, ale obtížně rozlišitelná. Z grafu je zřejmá přítomnost vodních par, jelikož se zde vyskytují absorpční maxima ve frekvencích 1,67 THz a 1,72 THz.

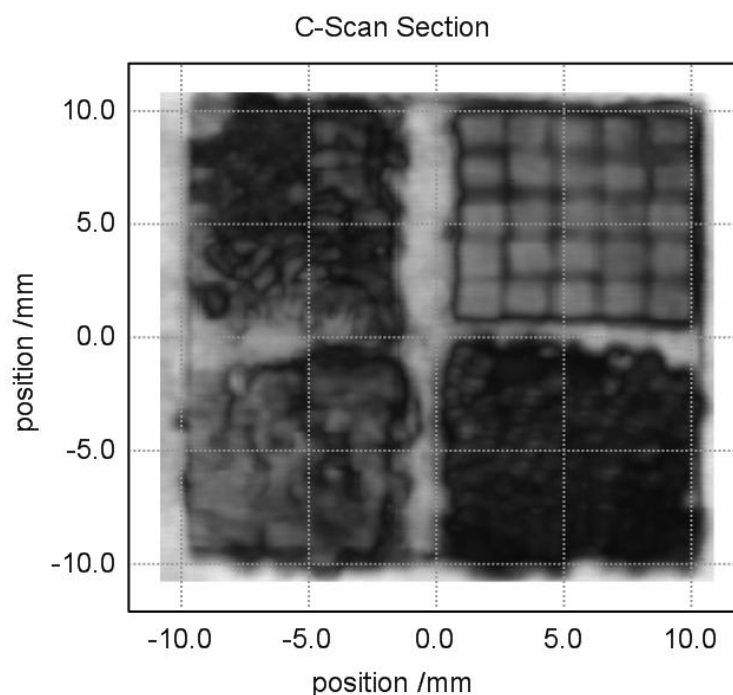
Na přístroji Tera OSCAT bylo provedeno měření za běžných podmínek v místnosti, tím pádem bylo měření zatíženo větší nepřesností způsobenou kombinací nízkého dynamického rozsahu přístroje a malého odstupů signál – šum. Zkvalitnění výsledků při měření na Tera OSCAT je podmíněno jinou metodou měření, kdy by bylo nutné buď vytvořit atmosféru bez vodních par či upravit vzorky tak, aby se zmenšila jejich koncentrace, tím pádem i absorpce. Poté by absorpční spektra měřených vzorků byla lépe odlišitelná. Zpřesnění výsledků by bylo možné také odlišnou konfigurací přístroje, kdy by

se zmenšila délka trajektorie svazku záření, a to by tak bylo méně ovlivněné atmosférickými vlivy.

6.3 THz zobrazování

Pro zobrazování byla použita výše popsaná metoda 2D skenování pomocí zaostřeného terahertzového záření, které prochází skenovaným vzorkem, odráží se od plochy zrcadla a vrací se zpět do detekční části přístroje. Software následně vyhodnocuje získaná data a je možné analyzovat vypočítané snímky a měnit parametry zobrazení.

Uvedené snímky byly získány skenováním plochy 2 x 2 cm s rozlišením 100 μm v každé ose. Následovala analýza dat, která odhalila uvedené souvislosti, ze kterých byla vyvozena konečná vyhodnocení. Jednotlivé vzorky, které byly použity pro skenování, jsou popsány v Kapitole 4.

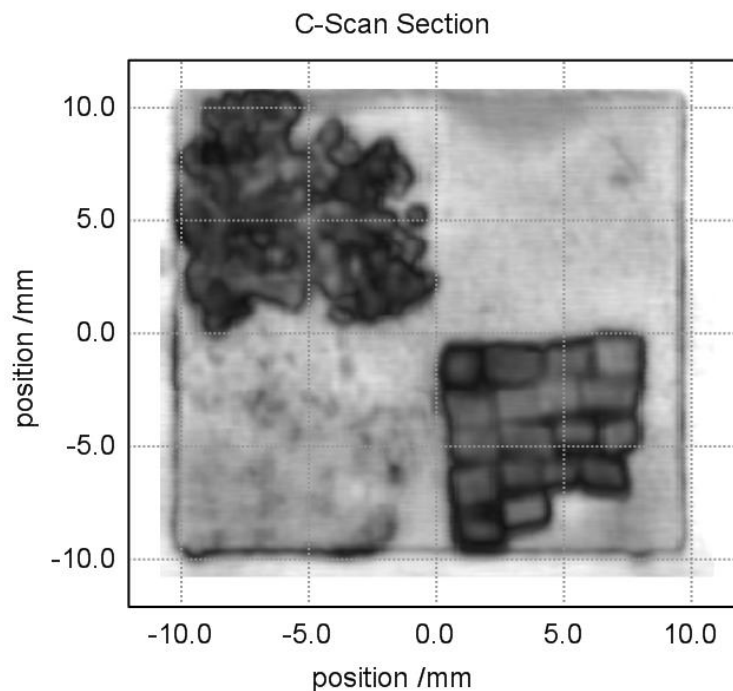


Obr. 21: THz snímek vzorku 1.

Na Obr. 21 je THz snímek čtyř látek vzorku 1. Ze snímku je patrný rozdíl mezi jednotlivými látkami, kdy se rozdílná absorpce projevuje změnou v odstínu šedi. Je také viditelná struktura jednotlivých látek (srovnatelné s fotografií vzorku). Čím tmavší je

odstín šedi na obrázku, tím vyšší je absorpce snímané látky. Z naměřených dat lze odlišit jednotlivé látky podle přesných hodnot absorpce.

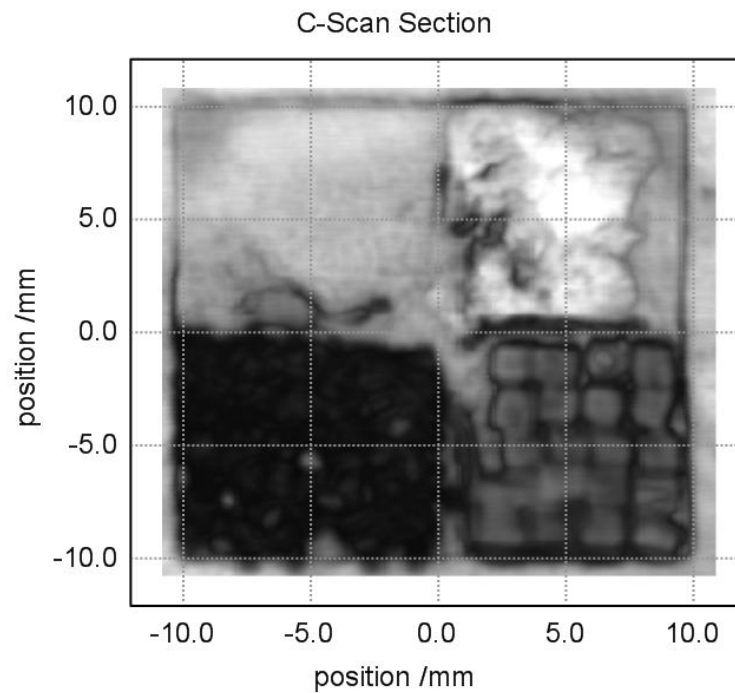
Stejným způsobem jsou vytvořeny i snímky vzorku 2 a 3. Rozsah stupnice šedi je u všech tří snímků shodný, je tedy možné je vzájemně porovnávat.



Obr. 22: THz snímek vzorku 2.

Na Obr. 22 je patrné, že cukr (levý dolní roh), který byl použit pro porovnání se střelnými prachy, nevykazuje téměř žádnou absorpci a při THz zobrazení je v podstatě neviditelný. Střelné prachy jsou tak snadno odlišitelné a i tentokrát je dobře viditelná struktura jednotlivých látek.

Na Obr. 23 vykazuje velmi vysokou absorpci grafit (levý dolní roh), který pohlcuje téměř veškeré THz záření. Při použití grafitu, jako maskovací látky, by tedy bylo velice obtížné identifikovat takto skryté střelné prachy. Střelný prach VIHTAUORI-N530 (pravý horní roh) se výrazně odlišuje od všech ostatních střelných prachů a z odstínu snímku je patrné, že THz záření odráží. Při použití metody 2D skenování je tento střelný prach jednoznačně identifikovatelný.



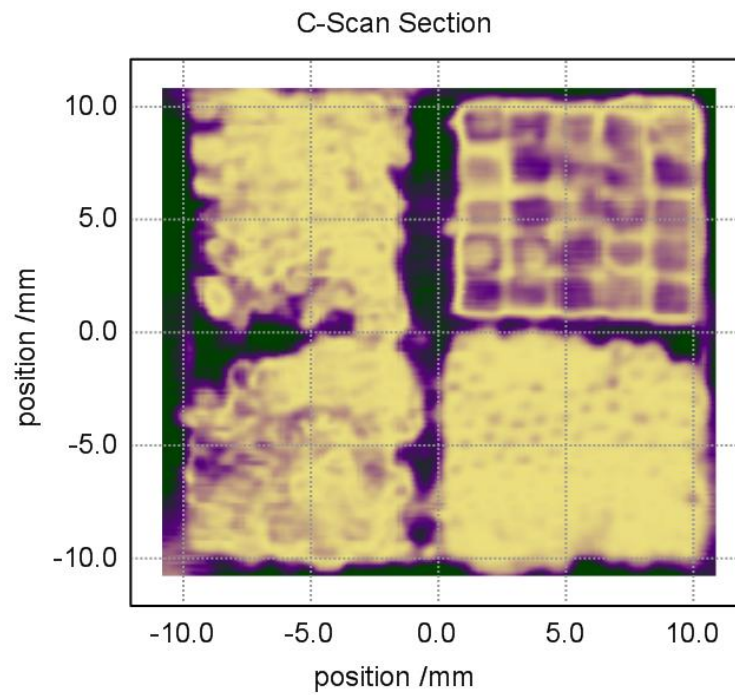
Obr. 23: THz snímek vzorku 3.

6.3.1 Analýza dat na vybraných frekvencích

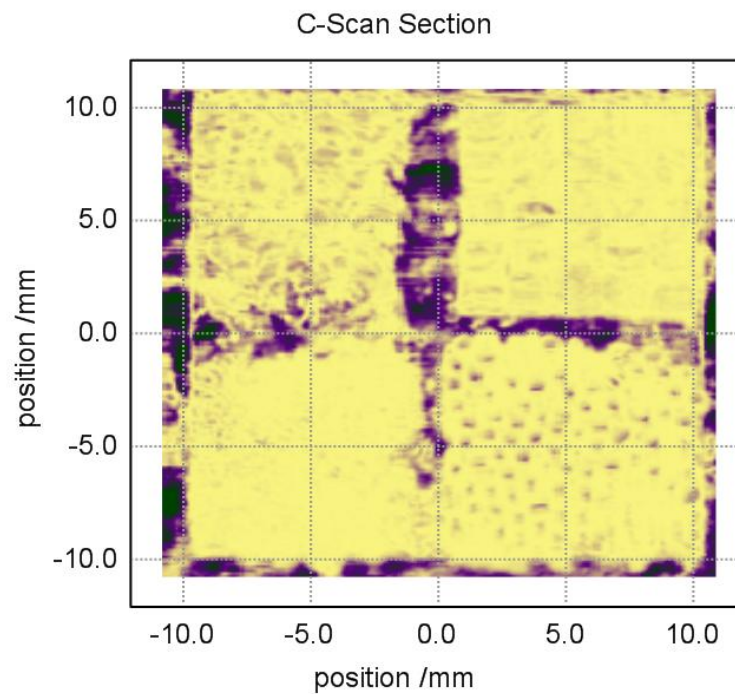
Snímky každého vzorku byly dále analyzovány ve frekvenční oblasti. Byly vybrány frekvence, při kterých se projeví významné rozdíly mezi jednotlivými látkami daných vzorků.

U vzorku 1 byly patrné významné rozdíly na frekvencích 0,65 THz a 1,95 THz. Na frekvenci 0,65 THz se výrazným způsobem odlišuje brokový nábojový prach (Obr. 24 – pravý horní roh). Jeho nižší absorpce THz záření na této frekvenci se vyznačuje převahou fialové barvy. Žlutá barva u ostatních látek naopak znamená, že mají absorpci vyšší.

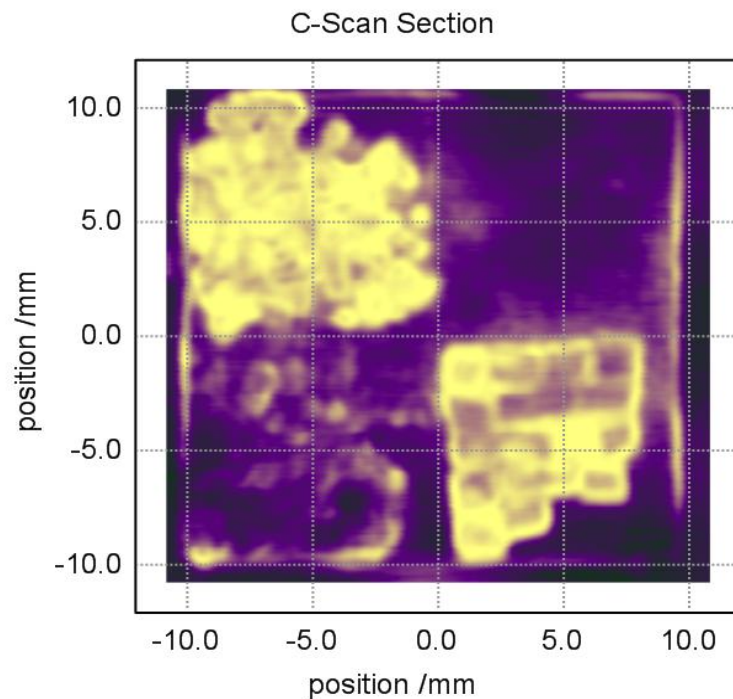
Na frekvenci 1,95 THz (Obr. 25) se od ostatních látek odlišuje LDPE (pravý dolní roh). To může být do jisté míry způsobeno vlhkostí, kterou do sebe látka absorbovala.



Obr. 24 Snímek vzorku 1 při frekvenci 0,65 THz.



Obr. 25: Snímek vzorku 1 při frekvenci 1,95 THz.

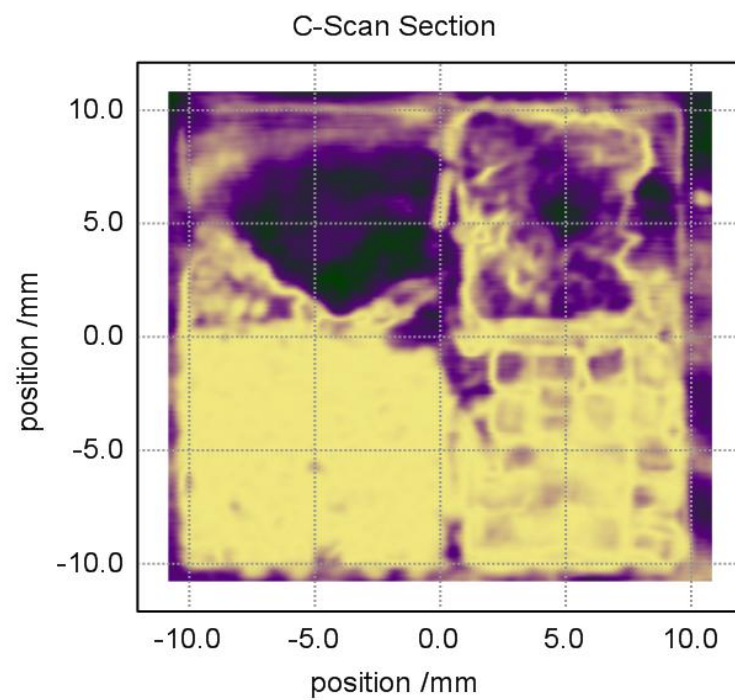


Obr. 26: Snímek vzorku 2 při frekvenci 0,55 THz.

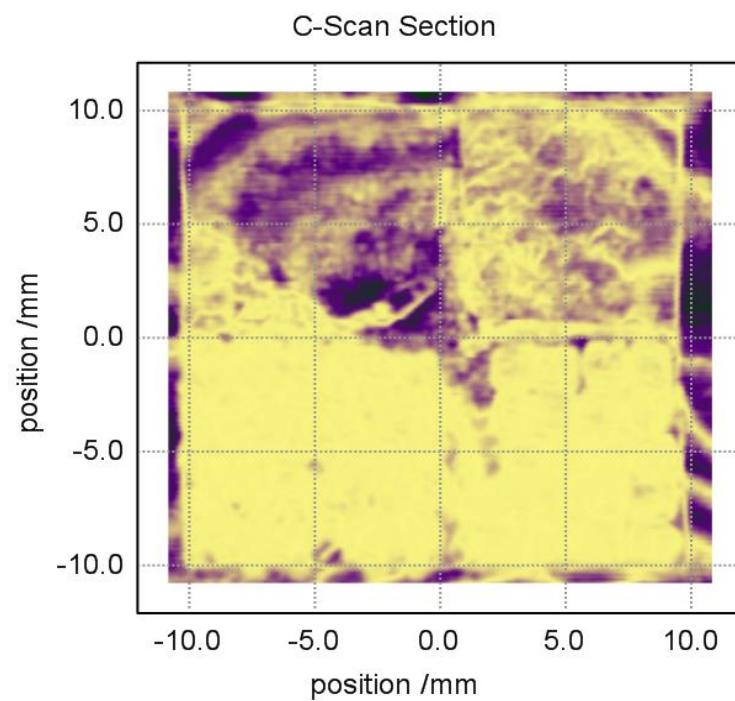
U vzorku 2 byly největší rozdíly patrné při frekvenci 0,55 THz (Obr. 26). Jak již bylo prokázáno při předchozí analýze (Obr. 22), cukr (vlevo dole) opět vykazuje jen minimální absorpci a lze jej snadno odlišit od střelných prachů. O něco více absorbuje THz záření střelný prach S035-1 (vpravo dole) a nejvyšší absorpci při frekvenci 0,55 THz vykazuje střelný prach PB Clermont.

U vzorku 3 je při všech frekvencích patrná vysoká absorpce grafitu a lze jej snadno identifikovat. Při frekvenci 0,8 THz (Obr. 27) je dobře identifikovatelný střelný prach VIHTAUORI-N530 (Pravý horní roh) díky odrazu záření od této látky.

Při frekvenci 1,45 THz (Obr. 28) již není téměř patrný rozdíl mezi grafitem (vlevo dole) a střelným prachem Vectan (vpravo dole), ale stále dobře identifikovatelný je VIHTAUORI-N530 (vpravo nahoře).



Obr. 27: Snímek vzorku 3 při frekvenci 0,8 THz.



Obr. 28: Snímek vzorku 3 při frekvenci 1,45 THz.

ZÁVĚR

Zobrazování a analýza látek pomocí terahertzového záření je založena na využití terahertzových elektromagnetických vln, které jsou schopny detekovat a identifikovat výbušniny, chemické i biologické materiály na základě jejich specifických spektrálních vlastností při průniku nebo odrazu daného spektra záření. Data z experimentálních měření potvrzují předpoklad, že mnoho materiálů důležitých v oblasti bezpečnostních aplikací, má charakteristické vlastnosti při průchodu nebo odrazu záření a lze je identifikovat. Předměty běžné osobní potřeby, jako jsou části oblečení, papír, plastové obaly nebo i kufry, se při zobrazování terahertzovým zářením stanou průhlednými. Oproti tomu metalické materiály ve většině případů kompletně odrazí terahertzové záření. Keramické materiály, jako například nože nebo jiné druhy zbraní z tohoto materiálu, záření částečně odrazí. Pokožka člověka, díky velkému obsahu vody a tekutin, absorbuje drtivou část záření. Díky tomu obraz osoby vytvořený na základě odrazu záření nastíní jen obrysy oblečení a odhalí předměty, které se skrývají pod ním, jako jsou klíče, mobilní telefony nebo předměty představující nebezpečí, zatímco pokožka se na monitoru zobrazí jako tmavá plocha.

Vývoj metod, které dokáží detekovat přítomnost výbušnin a jiných nebezpečných materiálů, začal v posledních letech nabývat na intenzitě. Nicméně nejen v bezpečnostních technologiích nalezne terahertzová spektroskopie uplatnění. Využívá se například i v oblasti kultury a historie při zkoumání různých písemností nebo rekonstrukci obrazů pod vrstvami omítky. Důležitou roli sehrává i ve zdravotnictví, kde lze touto metodou například zjišťovat přítomnost látek v těle nebo odhalit nádory a podobně.

Na základě měření, která byla provedena, se podařilo u některých druhů střelných prachů vypočítat specifické vlastnosti v určitém spektru THz záření, díky čemuž je možné tyto látky identifikovat a vzájemně od sebe odlišit. Při použití transmisní spektroskopie bylo dosaženo nejlepších výsledků u střelných prachů Vectan a Accurate. U střelného prachu Vectan je zřetelné absorpční maximum na frekvenci 1,22 THz, Accurate dosahuje velmi výrazné absorpce při frekvenci 1,34 THz. Tento fakt má velký význam v oblasti bezpečnostních technologií, jelikož je možné, při využití tohoto postupu, přispět k efektivnějšímu odhalování výbušných materiálů.

Při THz zobrazování byly zjištěny patrné rozdíly zejména při analýze dat na vybraných frekvencích. Na základě specifických vlastností střelných prachů, které se při této metodě

projevily, je možné jednotlivé střelné prachy dobře odlišit, případně identifikovat. Metodou THz zobrazování byly potvrzeny výsledky z transmisní spektroskopické analýzy, jelikož se zde projevují absorpční charakteristiky jednotlivých střelných prachů. THz zobrazováním také dokážeme věrohodně zobrazit povrch střelných prachů, a to i při jejich ukrytí do obalového materiálu, což přispívá k jejich identifikaci.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] LEE, Yun-Shik. Principles of Terahertz Science and Technology. Oregon : Springer, 2009. 340 s. ISBN 978-0-387-09539-4.
- [2] ROSTAMI, Ali; RASOOLI, Hassan; BAGHBAN, Hamed. Terahertz Technologies: Fundamental and Applications. Berlin : Springer, 2010. 255 s. ISBN 978-3-642-15792-9.
- [3] FEDERICI, John, et al. THz imaging and sensing for security applications: explosives, weapons and drugs. In Semiconductor Science and Technology. United Kingdom : [s.n.], 2005. s. 266-280. Dostupné z: stacks.iop.org/SST/20/S266.
- [4] ETAYO, D., I. MAESTROJUAN, J. TENIENTE, I. EDERRA a R. GONZALO. Experimental Explosive Characterization for Counterterrorist Investigation. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. 2013, vol. 34, 7-8, s. 468-479. DOI: 10.1007/S10762-013-9988-0. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10762-013-9988-0>.
- [5] GAVENDA, Tomáš; KŘESÁLEK, Vojtěch. Terahertz time-domain spectroscopy for distinguishing different kinds of gunpowder. SPIE Proceedings: Millimetre Wave and Terahertz Sensors and Technology VI. 2013, vol. 8900. DOI: 10.1117/12.2034126. Dostupné z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.2034126>.
- [6] CHEN, Jian, Yunqing CHEN, Hongwei ZHAO, Glenn J. BASTIAANS a X.-C. ZHANG. Absorption coefficients of selected explosives and related compounds in the range of 0.1-2.8 THz. Optics Express. 2007, vol. 15, issue 19. DOI: 10.1364/OE.15.012060. Dostupné z: <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=oe-15-19-12060>.
- [7] TPS Spectra 3000: Terahertz Equipment. [online]. [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: <http://www.teraview.com/products/terahertz-pulsed-spectra-3000/index.html>
- [8] GAVENDA, Martin. *Využití terahertzových frekvencí v bezpečnostních aplikacích*. Zlín, 2011. Diplomová práce. UTB Zlín.
- [9] Laboratory of Terahertz Spectroscopy, Prague. [online]. 9.5.2012. [cit. 2014-03-09]. Dostupné z: <http://lts.fzu.cz/en/intro.htm>

[10] FEDERICI, John, et al. THz standoff detection and imaging of explosives and weapons. In SPIE 5781, 75. 2005, s10. Dostupné z WWW:

<http://web.njit.edu/~federici/Research/THz/THz_stand_off-invited-SPIE-6-7-2005.pdf>.

[11] Objev: Detektor terahertzových vln. [online]. 25.11.2008. [cit. 2014-03-11]. Dostupné z: http://pandatron.cz/?558&objev:_detektor_terahertzovych_vln

[12] Jak terahertzové vlny rozbíjejí DNA. [online]. 7.1.2010. [cit. 2014-03-11]. Dostupné z: <http://www.osud.cz/jak-terahertzove-vlny-rozbijeji-dna>

[13] BERKA, Karel. Chemické nástroje detektivů. [online]. [cit. 2014-03-19]. Dostupné z: <http://ksicht.natur.cuni.cz/serialy/detektivni-chemie/2>

[14] INFRAČERVENÁ SPEKTROSKOPIE. [online]. [cit. 2014-03-19]. Dostupné z: <http://web.natur.cuni.cz/analchem/pprakt/ftir.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ATR	Spektroskopická metoda (zkratka z nagleického názvu attenuated total reflection)
cm	Centimetr, délková jednotka, dílčí jednotka metru
C-4	Plastická trhavina, je možné ji tvarovat bez vlivu na vlastnosti
DNA	Kyselina deoxyribonukleová, nosič genetické informace
K	Kelvin, jednotka termodynamické teploty
LDPE	Polyethylen - druh, zkratka z anglického Low density polyethylene
m	Metr, jednotka délky
mm	Milimetr, délková jednotka, dílčí jednotka metru
mg	Miligram, jednotka hmotnosti
n	Index lomu, bezrozměrná fyzikální veličina popisující šíření elektromagnetického záření
PETN	Pentaerytritoltetranitrát, silná výbušnina, používaná pro výrobu detonátorů a roznětných náloží
ps	Pikosekunda, jednotka času
RDX	1,3,5-cyklotrimethyltrinitramin, silná trhavina, často se vyskytuje jako příměs dalších trhavin jako například C-4 nebo semtex.
THz	Terahertz, jednotka frekvence (elektromagnetického vlnění)
TNT	2-methyl-1,3,5-trinitrobenzen, velmi silná, častou používaná trhavina
UV	Druh elektromagnetického záření o vlnové délce 400 – 10 nanometrů
α	Absorpční koeficient, vyjadřuje schopnost látky absorbovat elektromagnetické záření
μm	Mikrometr, délková jednotka, dílčí jednotka metru

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Spektrum terahertzového záření. [9]	11
Obr. 2: Generování THz vln z různých zdrojů. [1].....	14
Obr. 3: Charakteristické otisky výbušnin. [9]	16
Obr. 4: Schéma detekce výbušnin na větší vzdálenost. [3].....	18
Obr. 5: Terahertzový detektor. [11]	19
Obr. 6: Absorpce THz záření vzorkem. [13]	21
Obr. 7: Schéma principu detekce na blízku a na dálku. [3]	22
Obr. 8: Vzorek 1 pro THz zobrazování.	27
Obr. 9: Vzorek 2 pro THz zobrazování.	28
Obr. 10: Vzorek 3 pro THz zobrazování.	28
Obr. 11: Vzorky střelných prachů – podklad papír.....	29
Obr. 12: Vzorky látek pro měření – podklat lepicí páska.	30
Obr. 13: Přístroj TPS Spectra 3000. [7].....	32
Obr. 14: Systém Tera OSCAT.	33
Obr. 15: Absorpční spektra vybraných střelných prachů ATR.	34
Obr. 16: Absorpční spektra ostatních střelných prachů – ATR.	35
Obr. 17: Frekvenční spektra vybraných vzorků – TPS Spectra 3000.	36
Obr. 18: Absorpční spektra střelných prachů Vectan a Accurate.	37
Obr. 19: Absorpční spektra ostatních střelných prachů.	38
Obr. 20: Absorpční spektra střelných prachů – Tera OSCAT.	39
Obr. 21: THz snímek vzorku 1.	40
Obr. 22: THz snímek vzorku 2.	41
Obr. 23: THz snímek vzorku 3.	42
Obr. 24 Snímek vzorku 1 při frekvenci 0,65 THz.	43
Obr. 25: Snímek vzorku 1 při frekvenci 1,95 THz.	43
Obr. 26: Snímek vzorku 2 při frekvenci 0,55 THz.	44
Obr. 27: Snímek vzorku 3 při frekvenci 0,8 THz.	45
Obr. 28: Snímek vzorku 3 při frekvenci 1,45 THz.	45

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Optické vlastnosti vybraných materiálů v THz spektru. [1].....	13
Tab. 2: Základní parametry zdrojů terahertzového záření. [2]	15
Tab. 3: Střední hodnoty charakteristických frekvencí vybraných výbušnin. [3].....	23