

Využití THz spektroskopie ve vybraných bezpečnostních aplikacích

The use of THz spectroscopy in selected security applications

Bc. Daniel Štěpáník

Diplomová práce
2013

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Daniel ŠTĚPÁNÍK**
Osobní číslo: **A10445**
Studijní program: **N3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Využití THz spektroskopie ve vybraných bezpečnostních aplikacích**

Zásady pro vypracování:

1. **Popište stávající stav techniky využívající THz oblast spektra a její aplikace v oblasti bezpečnostních vědních disciplin.**
2. **Seznamte se s terahertzovým spektrometrem TPS spectra 3000 fy Teraview v laboratoři FAI UTB.**
3. **Vyberte, připravte a proměřte frekvenční charakteristiky některých polymerních materiálů.**
4. **Navrhňte a postavte měřicí celu pro měření spekter kapalných látek.**
5. **Provedte měření a analýzu spekter vybraných kapalných látek, vyskytujících se v bezpečnostních aplikacích.**
6. **Analyzujte možnosti uplatnění terahertzové spektroskopie pro detekci a identifikaci studovaných látek.**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. ROSTAMI, Ali; RASOOLI, Hassan; BAGHBAN, Hamed. Terahertz Technologies : Fundamental and Applications. Berlin : Springer, 2010. 255 s. ISBN 978-3-642-15792-9.
2. LEE, Yun-Shik. Principles of Terahertz Science and Technology. Oregon : Springer, 2009. 340 s. ISBN 978-0-387-09539-4.
3. FEKETE, Ladislav. Ultrafast carrier dynamics in semiconductors studied by Time-resolved terahertz spectroscopy. Prague, 2008. 78 s. Dizertační práce. Charles University in Prague. Dostupné z WWW: <http://lts.fzu.cz/pdf/t-lf.pdf>.
4. WILKE, Ingrid; SENGUPTA, Suranjana. Terahertz Spectroscopy : Principles and Applications. Boca Raton : CRC Press, 2008. Nonlinear Optical Techniques for Terahertz Pulse Generation and Detection? Optical Rectification and Electrooptic Sampling , s. 41-72. ISBN 13:978-0-8493-7525-5.
5. GAVENDA, Martin. Využití terahertzových frekvencí v bezpečnostních aplikacích. Diplomová práce FAI UTB ve Zlíně, 2011.
6. WALKER, Gillian C., at al. A simple fluid cell for the study of aqueous solutions using THz time-domain spectrtoscopy, Meas.Sci.Technol. 22(2011), 3, 037003.

Vedoucí diplomové práce:

doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.

Ústav elektroniky a měření

Datum zadání diplomové práce:

8. února 2013

Termín odevzdání diplomové práce:

3. června 2013

Ve Zlíně dne 8. února 2013

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan



doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Má diplomová práce se zabývá stávajícím stavem techniky v THz oblasti, návrhem a konstrukcí měřicí cely pro měření kapalných vzorků, na které provedu měření a nakonec zhodnotím budoucí využití THz spektroskopie.

Teoretická část práce řeší principy vysílání, přenosu, odrazu a detekování záření v oblasti terahertzového spektra.

V praktické části je vytvořen stručný popis funkce THz zařízení TPS spektra 3000. Hlavním cílem praktické části a zároveň i celé práce je návrh a zkonstruování měřicí cely využitelnou pro THz spektroskopii kapalných látek. Nejprve jsou vytipovány různé vzorky polymerů, na kterých jsou provedena měření v oblasti THz spektra. Na základě výsledků měření je zvolen nejvhodnější polymer, ze kterého je následně zkonstruována měřicí cely. Pak je vybrán vzorek materiálu vyskytující se v bezpečnostních aplikacích, u kterého jsou provedena měření v oblasti THz spekter.

V závěru práce jsou zhodnoceny výsledky měření, navrženo možné využití THz spektroskopie v bezpečnostních technologiích a možnost jejího budoucího vývoje.

Klíčová slova: THz zařízení, spektrum, THz zobrazování, bezpečnostní technologie, spektroskopie,

ABSTRACT

My thesis deals with the current state of the technology in the field of THz, design and construction of the measuring cell to measure liquid samples which is used to measurement and finally evaluation of the future utility of THz spectroscopy.

The theoretical part of the thesis solves principles of transmission, transfer, reflection and detection of radiation in the terahertz spectrum.

The practical part creates concise description of the function of THz device of TPS spectra 3000. The main target of the practical part and also the target of whole thesis is based on suggestion and construction for measuring cell usable for THz spectroscopy of liquids. First, there are identified the different samples of polymers on which they are take measurements in the field of THz spectrum. The most suitable polymers chosen based on the measurement results, which is then constructed measuring cell. Then the sample of

material, occurring in security applications, is chosen on which are made the measurements in the field of THz spectrums.

In conclusion part of the thesis, the measurement results are evaluated and the possible utilization of the THz spectroscopy in security technologies is suggested. Then the potential future development of the spectroscopy is evaluated.

Finally, the measurement results are evaluated, possible usage of the THz spectroscopy is suggested in security technologies and possible future development

Keywords: THz device, spectrum, THz screening, security technologies, spectroscopy.

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu doc. RNDr. Vojtěchu Křesálkovi, CSc. za jeho ochotu, věcné připomínky a odborný přístup během psaní mé diplomové práce. Stejně tak bych chtěl poděkovat za asistenci, rady a ochotný přístup při měření panu ing. Tomáši Gavendovi.

Dále bych chtěl poděkovat své přítelkyni, rodině a přátelům, kteří mě aktivně podporovali nejen ve studiu, ale v celém životě.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 STÁVAJÍCÍ TECHNIKA	12
1.1 TERAHERTZOVÉ ZDROJE	13
1.1.1 Optická rektifikace	17
1.1.1.1 Optická rektifikace v polovodičovém povrchu.....	18
1.1.1.2 Optická rektifikace v anorganickém elektro-optickém krystalu	20
1.1.1.3 Optická rektifikace v organickém elektro-optickém krystalu.....	20
1.1.1.4 Účinnosti konkrétních zdrojů.....	21
1.1.2 Generování THz záření s využitím rozdílové frekvence.....	22
1.1.3 Optické parametrické zesílení	23
1.1.4 Frekvenční multiplikování mikrovln.....	24
1.1.5 Foto-elektricky vodivé spínání	26
1.1.6 Foto-elektrické směšování.....	31
1.1.7 Elektronový urychlovač.....	33
1.1.8 Oscilátor zpětné vlny.....	35
1.1.9 Laser volných elektronů (Free-electron laser – FEL).....	37
1.1.10 Plynové lasery	39
1.1.11 P-typ germaniový laser.....	40
1.1.12 Kvantový kaskádový laser.....	42
1.2 TERAHERTZOVÉ DETEKTORY	45
1.2.1 Koherentní detektor.....	45
1.2.1.1 Elektro-optické vzorkování ve volném prostoru.....	47
1.2.1.2 Foto-elektricky vodivá anténa.....	49
1.2.1.3 Heterodynní detekování	50
1.2.2 Teplotní detektor	52
1.2.2.1 Bolometr	53
1.2.2.2 Pyroelektrický detektor	56
1.2.2.3 Golayův článek	57
1.3 TERAHERTZOVÁ OPTIKA	59
1.3.1 Zrcadla a čočky.....	59
1.3.2 Pásmový filtr	60
1.3.3 Vlnovod.....	61
II PRAKTICKÁ ČÁST	62
2 TERAHERTZOVÉ ZAŘÍZENÍ TPS SPEKTRA 3000	63
2.1 THz SPEKTROSKOPIE	63
2.2 ATR SPEKTROSKOPIE	67
2.3 TERAHERTZOVÉ PULZNÍ ZOBRAZOVÁNÍ.....	71
2.4 PŘÍPRAVA VZORKU PRO MĚŘENÍ	73
2.4.1 Požadavky na velikost pevného vzorku	73
2.4.2 Příprava pevných vzorků.....	73
2.4.3 Měření propustnosti kapalin.....	74

3	MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ VYBRANÝCH VZORKŮ POLYMERŮ	76
3.1	VZORKY POLYMERŮ	76
3.1.1	Polykarbonát (PK)	76
3.1.2	Polypropylen (PP)	77
3.1.3	Polystyren (PS).....	78
4	MĚŘÍCÍ CELY.....	80
4.1	MALÁ CELA	80
4.2	STŘEDNÍ CELA	80
4.3	VELKÁ CELA.....	81
4.4	MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ MĚŘÍCÍCH CEL	82
4.4.1	Spektrum měřících cel.....	82
4.4.2	Propustnost měřících cel	83
4.4.3	Absorbance měřících cel	83
4.4.4	Index lomu měřících cel.....	84
4.5	ZHODNOCENÍ VYUŽITELNOSTI MĚŘÍCÍCH CEL	84
5	MĚŘENÍ A ANALÝZA SPEKTER VYBRANÝCH LÁTEK	85
5.1	PŘÍPRAVA VZORKŮ	85
5.2	MĚŘENÍ SPEKTER THZ ZÁŘENÍ V MALÉ CELE.....	85
5.2.1	Spektrum propustné skrz vzorek	85
5.2.2	Porovnání absorbance	86
5.2.3	Porovnání propustnosti.....	87
5.3	MĚŘENÍ SPEKTER THZ ZÁŘENÍ VE STŘEDNÍ CELE.....	88
5.3.1	Spektrum propustné skrz vzorek	88
5.3.2	Porovnání absorbance	89
5.3.3	Porovnání propustnosti.....	90
5.4	VÝPOČET INDEXU LOMU VZORKU	90
5.4.1	Výpočet indexu lomu vzorku měřeného v měřící cele.....	91
6	ANALÝZA MOŽNOSTÍ UPLATNĚNÍ THZ SPEKTROSKOPIE	93
	ZÁVĚR	96
	ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ	98
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	100
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	103
	SEZNAM OBRÁZKŮ	105
	SEZNAM TABULEK.....	108
	SEZNAM GRAFŮ	109

ÚVOD

Rozvoj terahertzových (THz) technologií se začal ve větší míře rozvíjet teprve v 90. letech dvacátého století, především pro oblast astronomie a chemie. Můžeme říci, že tato oblast spektra se nachází v tzv. přechodové fázi, kdy dochází k velkým pokrokům a zároveň je zde spousta neprobádaných „zákoutí“. Dříve byla tato oblast často označována jako THz mezera (v technologickém smyslu), jelikož v porovnání s okolními frekvencemi nebyly vytvořeny pro práci s THz frekvencemi žádné funkční technologie.

V posledních letech se nové nástroje pro charakterizaci materiálů vyvíjely na základě pulzních terahertzových technologií. Terahertzová radiace, známá také jako záření v daleko-infračervené oblasti elektromagnetického spektra, se nachází mezi infračerveným (IR) a mikrovlnným (MW) elektromagnetickým zářením. THz záření zaujímá frekvence od 60 GHz do 4 THz ($= 2 \text{ cm}^{-1} - 133 \text{ cm}^{-1}$). Dnes je využívána především k analýze a lepšímu porozumění farmaceutickým materiálům a výrobkům.

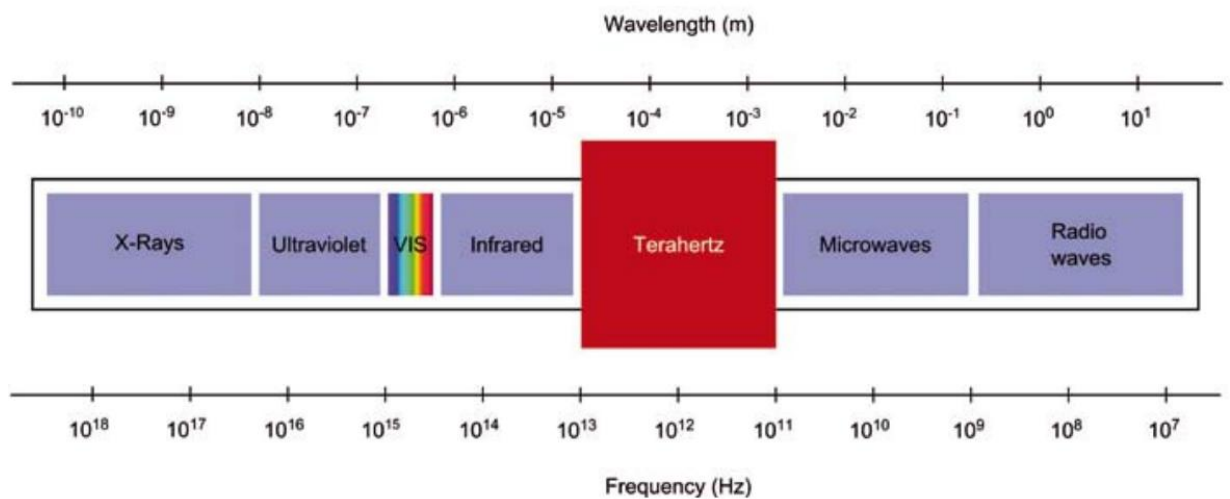
V česky psané literatuře se zatím nevyskytuje žádná kniha zabývající se dopodrobna THz technologiemi a tak data k této diplomové práci byla čerpána převážně z cizojazyčné literatury a internetových zdrojů.

V České republice se ještě donedávna nacházela jen jediná THz laboratoř a to Laboratoř THz (terahertzové) spektroskopie na Oddělení dielektrik ve Fyzikálním ústavu Akademie věd ČR. [GAVENDA, 2011] Jejím účelem je spíše výzkum obecného zaměření (základní výzkum). V lednu minulého roku se stala naše fakulta aplikované informatiky na UTB ve Zlíně druhou THz laboratoří, jejíž zaměření by mělo směřovat především na aplikace detekce drog a výbušnin.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 STÁVAJÍCÍ TECHNIKA

Nové nástroje a zařízení poslední doby pro charakteristiku materiálů byly vyvinuty na základě terahertzové (THZ) pulzní technologie. Jedná se o záření v daleko-infračervené oblasti elektromagnetického spektra, tzv. terahertzové ($60 \text{ GHz} - 4 \text{ THz} = 2 \text{ cm}^{-1} - 133 \text{ cm}^{-1}$), používá se k analýze a lepšímu porozumění farmaceutickým materiálům a výrobkům. Pomocí této technologie je možné přímo zjišťovat a využívat nové informace s jedinečnou rychlostí.



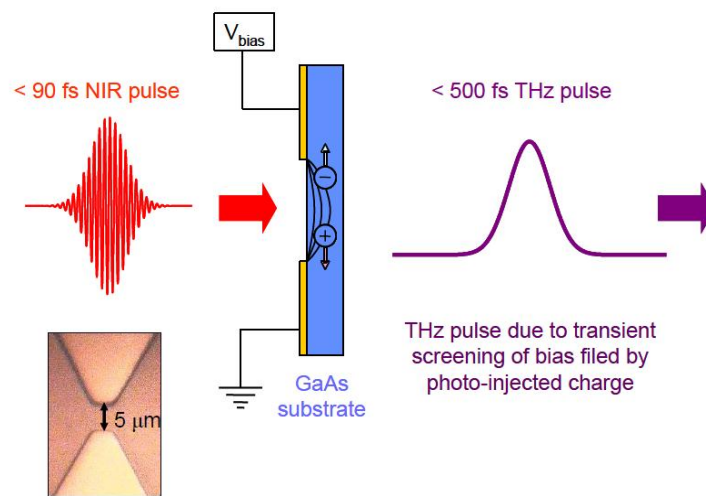
Obrázek 1 THz oblast elektromagnetického spektra. [Take a look inside, 2012]

Generace THz pulzního záření je založena na foto vodivých spínačích (obrázek 2). THz fotoelektrické zářiče spoléhají na výrobu několika cyklů THz pulsů pomocí ultra rychlého (femtosekundového) laseru vybuzeného neobjektivní arsenid galiovou anténou. Jedná se o širokopásmové připojení s vysílanou energií rozloženou v kmitočtovém rozsahu několika terahertz (typicky $0,06 \text{ THz} - 3 \text{ THz}$, což odpovídá 2 cm^{-1} až 100 cm^{-1}). Pulzní THz emise foto vodivé antény je produkována, jestliže je hustota proudu \mathbf{j} z neobjektivních polovodičů modulována v sub pikosekundových lhůtách $\mathbf{E}_{\text{THZ}} \propto d\mathbf{j} / dt$. Změna hustoty proudu, a tím změna foto proudu, vzniká ze dvou procesů: 1) rychlou změnou nosné hustoty pomocí ozáření femto sekundovým laserem a 2) urychlením foto-generování nosiči spadajícími pod vnější elektrické pole. [Terahertz equipment, 2013]

Koherentní detekce THz záření je prováděna obdobným obvodem foto-vodivé antény. Ve vstupní soustavě, fotovodivé mezery s femtosekundovým pulsem synchronizovaným na THz emise, se měří proud úměrný THz elektrickému poli. Tím, že se mění délka optické

dráhy k přijímači, by měla být znovu vzorkována THz časová doména. Z tohoto důvodu je možné získat amplitudu a fázi THz dopadající vlny. [Terahertz equipment, 2013]

THz pulsní zařízení vyžadují minimální údržbu a jsou relativně kompaktní a mobilní, a není třeba využívat náročné řešení chlazení. Síla THz záření používaného k měření je nižší než $1 \mu\text{W}$, takže nedochází k indukování tepla do vzorku. Tato úroveň záření se pohybuje pod úrovní tepelného záření pozadí. [Terahertz equipment, 2013]



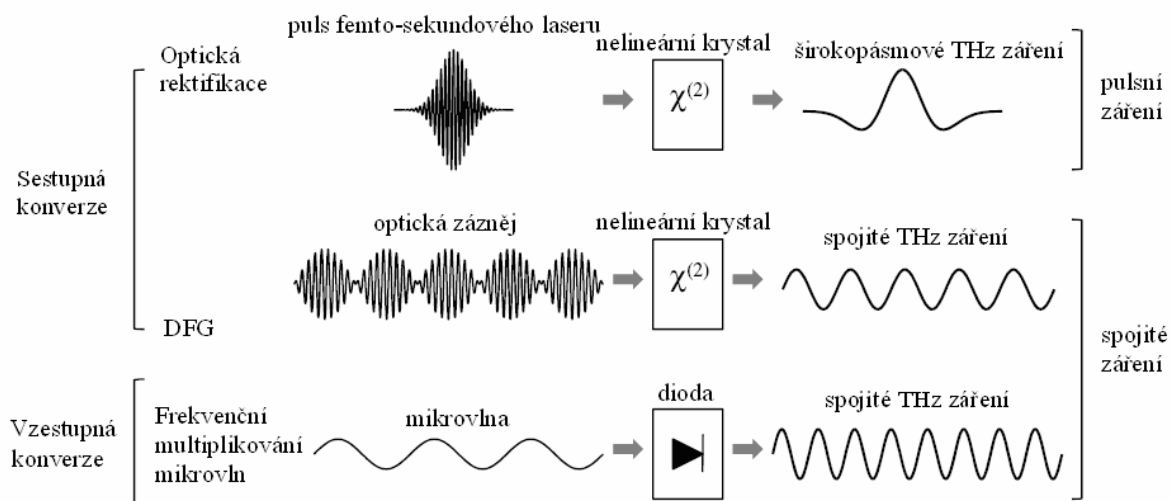
Obrázek 2 Princip THz pulzního generování. [Terahertz equipment, 2013]

1.1 Terahertzové zdroje

Pro vytvoření záření v oblasti THz spektra existuje několik metod, které používají především principy vytváření záření v oblasti mikrovln a také principů z opačné oblasti vzdáleného infračerveného (IR) záření. Vygenerování THz záření je závislé na vlastnostech použitých materiálů (především u polovodičů dochází při vyšších frekvencích k velkým ztrátám způsobeným přechodovým časem – tzv. roll-off), pak rozměrností výkonných zdrojů (velké zdroje vytvářejí silné THz záření, ale pro svou velikost jsou nepoužitelné pro téměř veškerou aplikaci, oproti tomu mají malé zdroje zase menší intenzitu záření). Další omezení, spočívající spíše v aplikační oblasti, se týkají cenové dostupnosti některých technologií, energetických ztrát při vytváření záření a pracovní teploty. Pracovní teplota je hlavním omezením mnoha THz zdrojů vyžadujících pro svou činnost kryogenické chlazení, které z těchto zdrojů vytváří nepraktické zařízení. [LEE, 2009]

Záření generované THz zdroji můžeme dělit podle řady kritérií např. technologie, jež byla použita k vytváření záření, vlastnosti vytvořeného záření (pulzní / spojitě, širokopásmové / úzkopásmové) anebo výkon, kterého může dosáhnout. [GAVENDA 2011] V další části si stručně rozebereme jednotlivé technologie, jež jsou využívány pro THz zdroje a následné dosažené záření.

Mezi možné způsoby jak lze generovat THz záření patří ozáření nelineárního materiálu, které způsobí frekvenční konverzi dané elektromagnetické vlny. Optickými procesy druhého řádu, jako je **optická rektifikace (OR)**, nebo **směšování rozdílných frekvencí (DFG - difference frequency generation)**, je vytvářen THz foton o frekvenci f_T . Tato frekvence je vytvořena interakcí dvou optických fotonů o frekvenci f_1 a f_2 v nelineárním krystalu, kdy $f_T = f_1 - f_2$. Širokopásmovými THz pulzy procházejícími skrz optickou rektifikaci, jsou vytvářeny pulzy z femto-sekundového laseru s rozsáhlým spektrem (s šířkou pásma okolo 10 THz). [GAVENDA, 2011] Tvar těchto širokopásmových pulzů je podobný tvaru optických pulzů. Spojité THz záření je vytvářeno pomocí DFG ze dvou spojitých optických paprsků THz polovodičového zdroje založeného na mikrovlnné technologii pracující s příchozí mikrovlnou, kterou konvertují na jejich harmonickou vlnu. Tyto zdroje využívají diod se silnou nelineární charakteristikou třídy I-V. Urychlováním nábojů a časově proměnným proudem je vyzařována elektromagnetická vlna. [LEE, 2009]



Obrázek 3 Rozdělení THz zdrojů. [LEE, 2009]

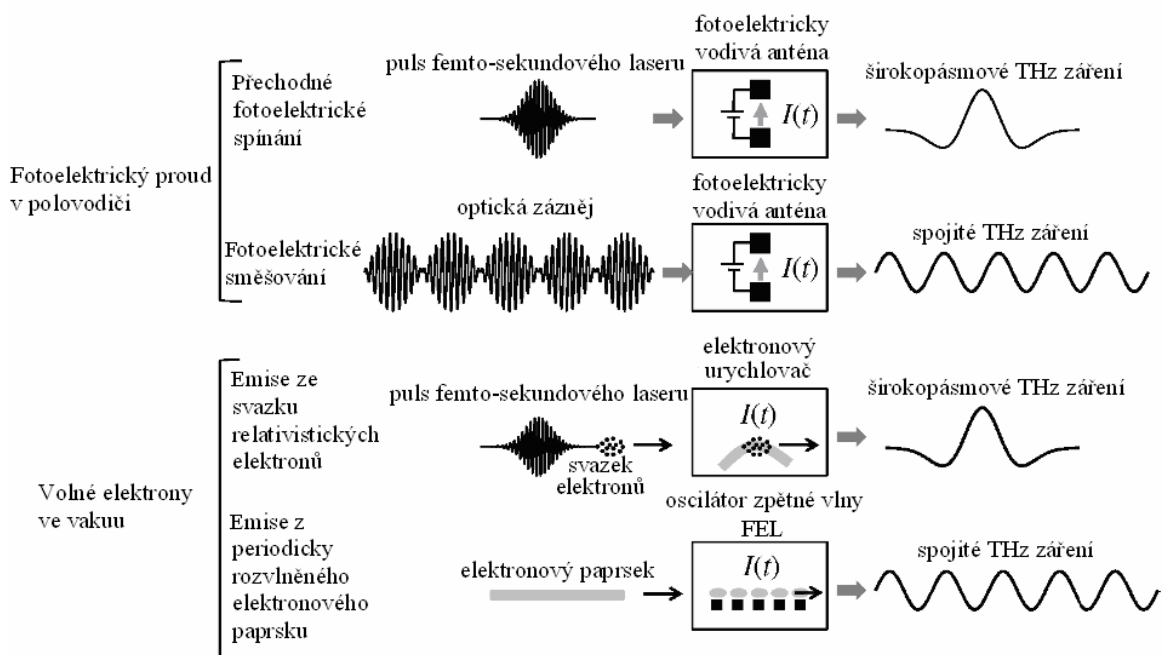
Thz záření můžeme vytvářet fotoelektricky vodivou PC (photoconductive) anténou s předpětím, kterou ozařujeme laserovým paprskem. PC anténa se skládá z dvojice

kovových elektrod, které jsou nanесeny na polovodičovém podkladu. Optickým paprskem se ozařuje mezera mezi elektrodami a tím jsou vytvářeny fotoelektrické nosiče a volné nosiče jsou urychleny statickým napěťovým polem. V závislosti na intenzitě laserového paprsku, se mění v čase tento fotoelektrický proud. Tím jsou vytvořeny širokopásmové THz pulzy femto-sekundovým laserem. [LEE, 2009]

Směšováním dvou laserových paprsků o rozdílných frekvencích vzniknou optické záněje, které vytvoří výsledné spojitě THz záření o zánějové frekvenci. **Tuto metodu nazýváme fotoelektrické směšování (phatomixing).** [LEE, 2009]

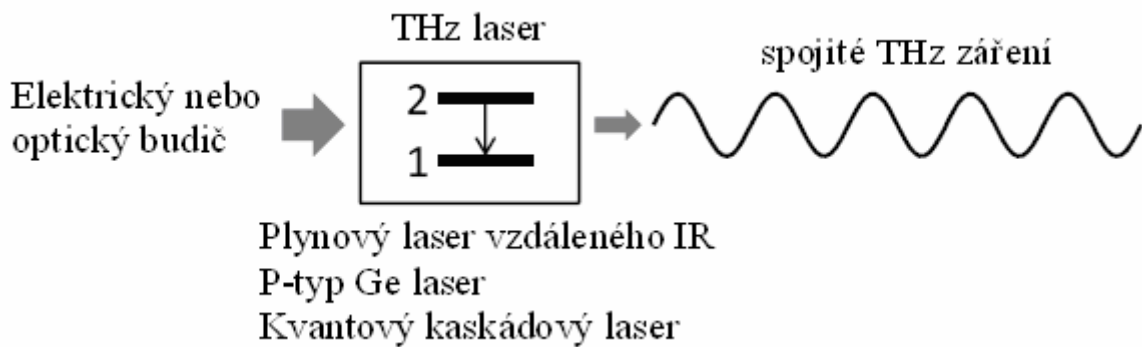
Elektronovými urychlovači se vytváří pomocí relativistických elektronů extrémně jasné THz záření. Elektronový zdroj se budí ke generování ultrakrátkých pulzů elektronů femto-sekundovým laserem. Následně jsou urychleny na relativistickou rychlost a vystřeleny směrem na kovový cíl, nebo jsou donuceny ke kruhovému pohybu pomocí magnetického pole. Pomocí tohoto přechodného elektronového urychlování je vytvořeno koherentní THz záření. [LEE, 2009]

Oscilátor odražené vlny (BWO-backward wave oscillator) je zařízení laboratorní velikosti a „FEL“ (FEL – free-electron laser), elektronový urychlovač malého měřítka, je velké zařízení. I přes obrovský nepoměr velikostí těchto zdrojů mají podobný způsob vytváření THz záření. U obou případů je využito elektronového paprsku rozvlněného periodickou strukturou: BWO používá kovové mřížky a FEL magnetické pole. Výsledné spojitě THz záření je vytvářeno pomocí urychlování elektronů. [GAVENDA, 2011], [LEE, 2009]



Obrázek 4 Dělení THz zdrojů. [LEE, 2009]

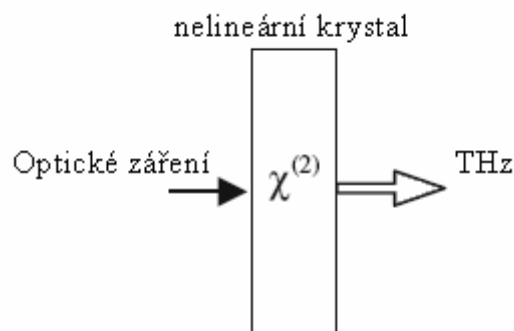
Pro činnost laseru je potřeba inverzně obsazeného dvou hladinového kvantového systému. Přechodové frekvence plynných laserů dalekého IR záření, jež využívají molekulární rotační energie, se řadí do THz oblastí. P-typ germaniové lasery se řadí do elektricky buzených polovodičových laserů, jejichž vyzařováním jsou inverzně obsazeny dvě Landauovy úrovně formované horkými nosiči, které jsou umístěny do elektrického pole zkříženého s polem magnetickým. Kvantový kaskádový laser (QCL - quantum cascade lasers) je polovodičový hetero-strukturní laser složený z opakovaně se střídajících vrstev různých polovodičů.[GAVENDA, 2011] Přechodem mezi těmito subpásmami polovodičových nano-struktur jsou vytvářeny THz fotony. V QCL laserech je vytvářeno koherentní záření pomocí elektronů, které postupně podstupují přechody mezi jednotlivými subpásmami. [LEE, 2009]



Obrázek 5 Typy THz zdrojů. [LEE, 2009]

1.1.1 Optická rektifikace

Jedná se o konverzi záření optického na THz spektrum průchodem nelineárním materiálem. Řadíme ji k nelineárním optickým jevům druhého řádu.



Obrázek 6 Zobrazení principu optické rektifikace.

Optickou rektifikaci můžeme jednoduše vyjádřit jako směšování dvou frekvencí f_1 a f_2 vzájemně blízkých s šířkou pásem pohybujících se v oblasti optických pulzů. Směšováním vznikne jediná frekvence f , odpovídající rozdílu směšovaných frekvencí ($f = f_1 - f_2$), která se nachází v THz spektru záření. Platí pravidlo, že čím kratší jsou pulzy vstupních frekvencí, tím větší je šířka výsledného pásma. To dává možnost k směšováním i vzdálenějších frekvencí, a tím rozšířit THz spektrum. [FEKETE, 2008]

Výsledná intenzita THz záření závisí na intenzitě budícího pulzu, nelineárním koeficientu kvadratické susceptibility a fázovém synchronismu optických frekvencí. Jelikož optická

rektifikace je nelineárním procesem druhého řádu, tak intenzita THz signálu je druhou mocninou intenzity budícího pulzu. [GAVENDA, 2011]

THz záření generované optickou rektifikací může vznikat v různých materiálech, tak je nutné rozlišit různé způsoby generování záření:

1. Vysokou energií fotonů dosáhnou fotony v nelineárním materiálu vodivé sféry, čímž jsou uvolněny fotony z valenční sféry, a ty způsobí vyzáření volných nosičů. Tím dosáhne nelineární koeficient susceptibility nejvyšší možné hodnoty a způsobí zesílení rezonance. [FEKETE, 2008]
2. Naopak je-li energie fotonů tak nízká, že fotony nedosáhnou vodivé sféry, dochází pouze k vytváření neharmonických potenciálů nosičů (virtuálního přechodu). Velice důležitou podmínkou se stává fázový synchronismus, který je obvykle charakterizován zářením, jež je možné vyjádřit jako rozdíl indexu lomu svazku optických pulzů a indexu lomu THz frekvencí. Příkladem materiálu, u kterého je změna nerezonantní, a doznívající stav mizí vlivem budícího záření o vlnové délce kolem 800nm, je ZnTe. Efektivita optické rektifikace v daném materiálu je omezena procesem dvou-fotonové absorpce, jejíž velikost není při vysokých budících intenzitách zanedbatelná. [FEKETE, 2008]

Seznam materiálů krystalů používaných ke generování s využitím THz OR [DEXHEIMER, et al., 2008], [GAVENDA, 2011]:

Polovodiče – GaAs, InP, CdTe, InAs, InSb, Gap, ZnTe, ZnCdTe, GaSe.

Anorganický elektro-optický krystal - LiNbO₃, LiTaO₃.

Organický elektro-optický krystal - 4-N-methylstilbazolium tosylate (DAST)

- N-benzyl-2-methyl-4-nitroaniline (BNA)

- (-)-2-(α -methylbenzyl-amino)-5-nitropyridine (MBANP)

- elektro-optické polymery

1.1.1.1 Optická rektifikace v polovodičovém povrchu

Byla objevena formou pokusů na počátku 90. let. THz záření je vytvářeno optickou rektifikací, kdy jsou vysílány na povrch polovodiče femto-sekundové optické pulzy. [ZHANG, 1990]

Zpočátku nebylo jasné, co způsobuje vznik THz záření na povrchu polovodičů. Až roku 1992 Chuang dokázal úspěšně vysvětlit všechna předchozí experimentální pozorování. Jeho návrh teoretického modelu byl založen na OR femtosekundových laserových pulzů. Zkoumání fyzikální podstaty OR v závislosti na opticky směrově závislé intenzitě zjistilo, že vytváření THz záření pomocí optické rektifikace je buď nelineárním optickým procesem druhého řádu řízeným tenzorem rozsáhlé susceptibility druhého řádu, nebo nelineárním optickým procesem třetího řádu, pomocí kterého nelineární susceptibilita druhého řádu vyplývá ze směšování statického vyprázdněného pole povrchu a tenzoru nelineární susceptibility třetího řádu. [CHUANG, 1992], [GAVENDA, 2011]

Generování THz záření optickou rektifikací femto-sekundových laserových pulzů bylo doposud vytvořeno jen z krystalů o tvarech $\{100\}$, $\{110\}$, $\{111\}$, které mají běžnou sfaleritovou strukturu polovodičů, převážně III-V (někdy II-VI) řádu. Pokusy provedené na těchto tvarech krystalů u GaAs, CdTe a InP a typu $\{110\}$ GaP byly naprosto stejné s teoreticky vytvořenými výsledky. Což svědčí o tom, že OR druhého řádu je hlavním nelineárním procesem za podmínek průměrné opticky směrově závislé intenzity (nJ/cm^2) a kolmého dopadu budícího záření na polovodič bez napětí. [DEXHEIMER, et al., 2008], [GAVENDA, 2011]

THz záření můžeme také získat při vysoké opticky směrově závislé intenzitě ($1\text{-}2 \text{ mJ/cm}^2$) s nekolmým dopadem budícího záření z krystalu úzkopásmového polovodiče InAs a InSb. Změnou úhlu budícího paprsku dopadajícího na krystal můžeme různě měnit účinnost generování THz záření. [GU et al., 2002]

Mezi nejvýznamnější krystal se sfaleritovou strukturou patří ZnTe. Poprvé jej použil k experimentu Nahata, který tento krystal využil pro generování i pro detekci pomocí budícího mode-lock titan safírového laseru. Slibným polovodičovým krystalem, který nepatří mezi krystaly se sfaleritovou strukturou je GaSe. Vytvořené THz záření má velkou šířku pásma až do 41 THz. [NAHATA, WELING and HEINZ, 1996], [LIU, XU and ZHANG, 2004]

Při generování a detekci širokopásmového THz záření, které využívá laserový zdroj s délkou pulzu kratší než 20fs jsou výkony soustav vysílače a přijímače GaSe krystalu srovnatelné a možná i větší než při použití ZnTe krystalů. Použitím vhodné tloušťky vysílače a detektoru GaSe krystalu můžeme vytvořit frekvenčně selektivní THz vlny. Nevýhoda GaSe krystalu spočívá v jeho křehkosti, na kterou musíme během používání brát ohled. [DEXHEIMER, et al., 2008]

1.1.1.2 Optická rektifikace v anorganickém elektro-optickém krystalu

Hlavním představitelem anorganických elektro-optických krystalů využívaných ke generaci THz záření s použitím optické rektifikace je LiNbO₃ krystal. Za jeho využití se vytvářelo terahertzové záření již na přelomu 60. a 70. let. Cílem výzkumů tehdejší doby bylo dosažení laditelného koherentního vzdáleně infračerveného záření vytvořeného pomocí optických technologií. [KAWASE et al., 1996]

Velkou výhodou je jeho dostupnost a tak bývá často používán pro experimenty využívající optickou rektifikaci.

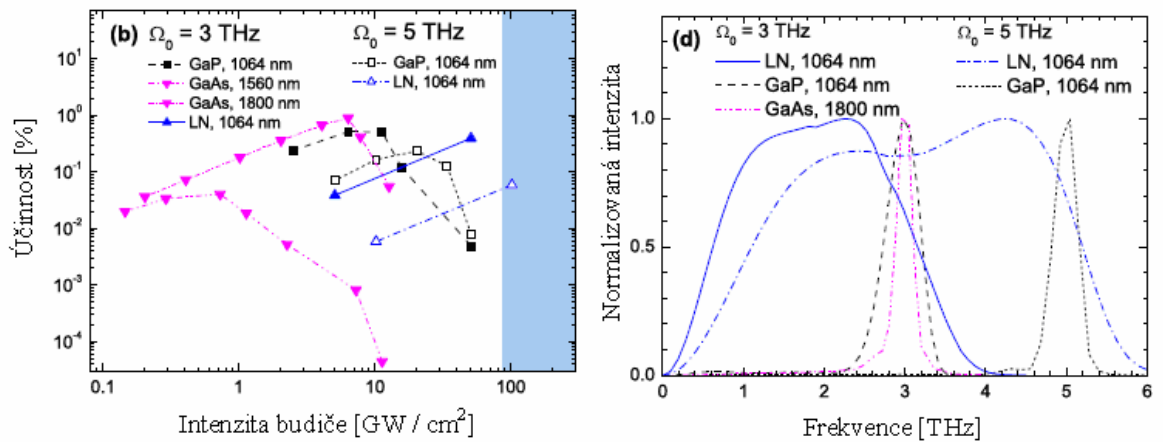
1.1.1.3 Optická rektifikace v organickém elektro-optickém krystalu

Z této skupiny materiálů krystalů se používá především DAST. Zvýšený zájem o výrobu velmi kvalitního DAST krystalu je závislý na jeho neobvykle velké nelinearitě a vysokém koeficientu optické a elektrooptické nelinearity druhého řádu. Ty jsou dvakrát větší než má anorganický krystal LiNbO₃. [STILLHART et al., 2006]

K výhodám DAST anorganického krystalu patří, že jej můžeme využít pro experimentování s budícím laserem při telekomunikační vlnové délce 1.5 μm. Těmito experimenty je spektrum rozšířeno na oblast od 1.3 do 4.8 THz s hodně vysokou účinností konverze (max $E_{\text{THz}} = 50$ kV/cm při energii optického pulzu 25 μJ v 0,6mm silném krystalu). [SCHNEIDER, STILLHART, GUNTER, 2006]

Ultra rychlé vláknové lasery jsou při srovnání s titan-safírovými lasery malé, což může do budoucna vést k tomu, že si budeme moci spektroskopické THz zařízení vložit například do kufříku. [FEKETE, 2008]

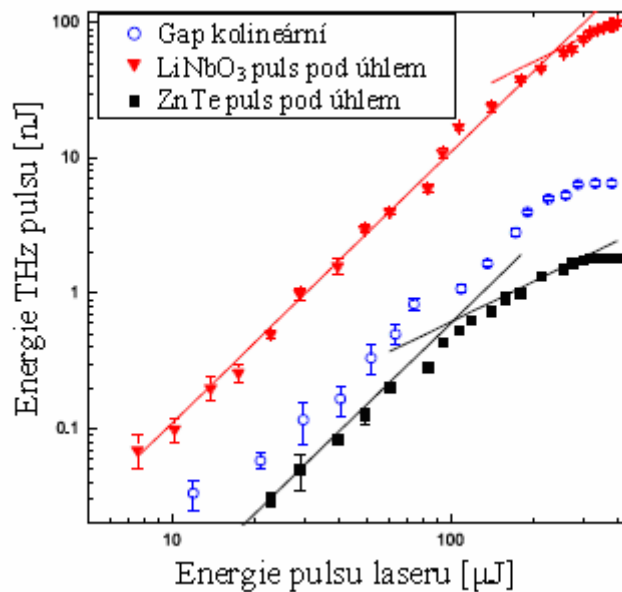
1.1.1.4 Účinnosti konkrétních zdrojů



Obrázek 7 Grafické vyobrazení účinnosti THz záření získaného optickou rektifikací. [GAVENDA, 2011]

V levém grafu můžeme vidět závislost efektivity generování THz záření (dvou frekvencí – 3 a 5 THz) na intenzitě budícího záření u různých materiálů krystalů a pro různé vlnové délky budícího záření. V grafu můžeme jednoduše porovnat kombinaci krystalu a vlnové délky budícího záření k dosažení konkrétní THz frekvence. [FÜLÖP et al., 2010]

Ke generaci THz pulzů s vysokou spektrální intenzitou mohou být vhodné polovodiče, zatímco pro generování THz pulzů s velice rozsáhlou relativní spektrální výškou je vhodnější LiNbO_3 . [HOFFMANN et al., 2007]



Obrázek 8 Graf Závislost energie THz pulsu na energii budícího pulsu laseru.

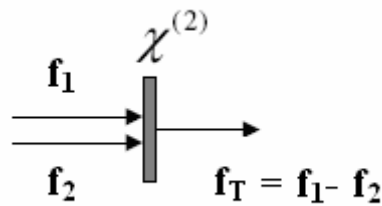
[HOFFMANN et al., 2007]

Graf zobrazuje závislost energie terahertzového záření, jež je produkováno energií budícího záření s vlnovou délkou 1035nm na krystalu. Na krystal GaP byl paprsek přiveden kolmo na plochu a na krystal LiNbO₃ a ZnTe byl vyslán pod určitým úhlem. [HOFFMANN et al., 2007]

1.1.2 Generování THz záření s využitím rozdílové frekvence

(DFG - difference frequency generation) je nelineární proces druhého řádu, kterým je vytvářena elektromagnetická vlna o frekvenci $f_T = f_1 - f_2$, kde f_1 a f_2 je vstupní frekvence v optickém spektru. Tyto optické vlny jsou přiváděny na nelineární krystal a výsledkem je frekvence, která je jejich rozdílem. [LEE, 2009]

Optickou rektifikaci můžeme s patřičnými komponenty označit za DFG, ale bez širokopásmových ultrakrátkých laserových pulzů. V následující části si rozebereme dva typy vytvoření úzkopásmového THz záření a to DFG se zdvojeným vstupním paprskem a parametrické generování s jedním optickým budičem. [LEE, 2009]



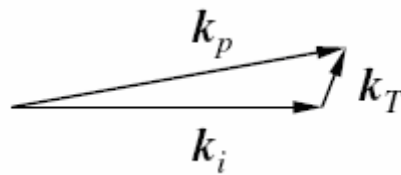
Obrázek 9 Schéma principu vytváření DFG. [LEE, 2009]

Obrázek (Obrázek 9) znázorňuje jednoduché schéma principu DFG, který vyžaduje necentrosymetrický krystal. Pro zjednodušení předpokládáme, že je to velmi tenký krystal a zanedbáváme jakékoli jevy spojené s šířením vln. Stejně tak jako u fotoelektrického směšování, jsou pro DFG optickým zdrojem dva úzkopásmové laserové paprsky s malým rozdílem frekvencí (f_1 a f_2). Pokud se tyto dva optické paprsky šíří stejnou dráhou a jsou polarizovány ve stejném směru, pak je jejich interferencí vytvářena záněj, jež osciluje na rozdílové (zánějové) frekvenci $f_T = f_1 - f_2$ kde $f_1 > f_2$. [LEE, 2009]

Nejúčinnějším nelineárním krystalem vyzkoušeným pro DFG, je pro generování nejúčinnější GaAs. Má několik význačných vlastností, zaprvé má velice vysoký koeficient optické nelinearity druhého řádu, za druhé může dosáhnout fázového synchronismu s optickými budícími paprsky v oblasti infračerveného záření. [GAVENDA, 2011] Výslednou THz frekvenci je možno plynule ladit v rozsahu od 0,2 do 5,3 THz. A za třetí má GaAs krystal poměrně nízkou lineární absorpci záření v THz spektru. Podstatně nižší účinnosti THz vyzařování pomocí DFG bylo dosaženo s krystaly z nelineárních materiálů LiNbO₃, GaP a DAST. [LEE, 2009]

1.1.3 Optické parametrické zesílení

Se řadí mezi optický nelineární proces druhého řádu. Foton budícího pulzu je rozdělen na dva fotony s nižší energií. Jejich součet fotonových energií je roven energii budícího fotonu: $E_p = E_i - E_T$, kde budící foton je E_p a jalový E_i . Jalový foton se nachází ve spektru opticky frekvenčním a signálový E_T foton ve spektru THz. K zesílení vln dojde při splnění podmínky fázového synchronismu signálové a jalové složky. [LEE, 2009]



Obrázek 10 Fázový synchronismus v krystalu LiNbO₃ pro OPA. [LEE, 2009]

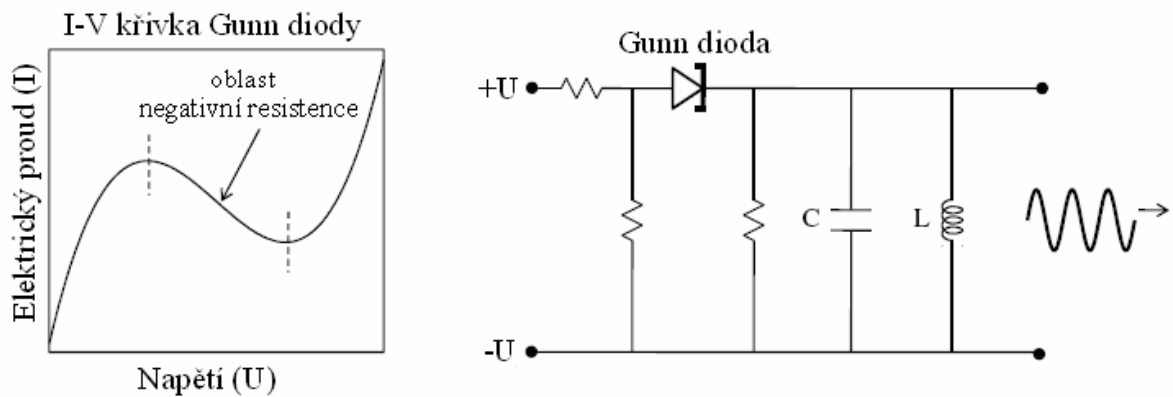
Tento proces můžeme využít pro vytvoření laditelných úzkopásmových THz vln v krystalech LiNbO₃. Na obrázku (Obrázek 10) můžeme vidět vztahy fázových vektorů vln: optické k_p , jalové k_i a THz k_T . [LEE, 2009]

Dané vektory nejsou sfázovány kolineárně a tak je možné THz frekvenci plynule ladit změnou úhlu budící a jalové vlny. [LEE, 2009]

1.1.4 Frekvenční multiplikování mikrovln

Jedná se o další z metod polovodičových zdrojů, jež je spojena s mikrovlnnými technologiemi. Výstup z mikrovlnného syntetizéru (high-end modely) je využit jako vstupní signál pro polovodičový THz zdroj. V polovodičových THz zdrojích se multiplikuje frekvence příchozí mikrovlny Schottkyho bariérovou diodou. Frekvenční multiplikátory mikrovlnné syntetizéry jsou výrobky sofistikovaného inženýrství zahrnujícího nejmodernější elektronické technologie. [ROSTAMI a kol., 2010]

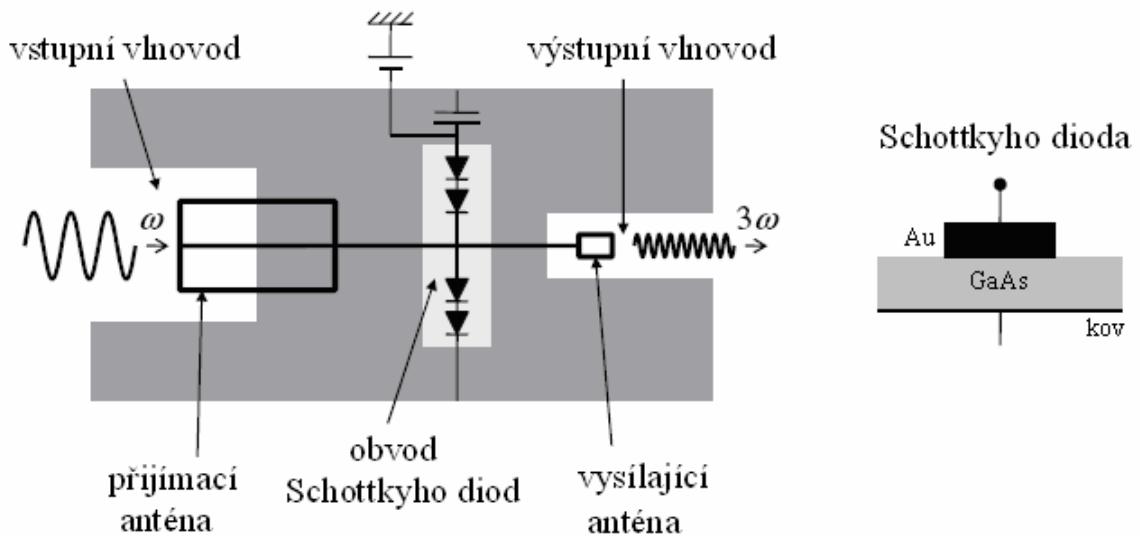
Polovodičové mikrovlnné zdroje využívají Gunn a tunelové diody. Jedná se o dvoupólové součástky s negativní resistencí. Připojení těchto zařízení na rezonátor způsobí přeměnu stejnosměrného elektrického signálu na střídavý signál s frekvencí v pásmu mikrovln. Hlavní výhodou daného mikrovlnného generování je negativní resistance, kterou můžeme vidět na křivce I - V (Obrázek 11). Taktéž je vidět jednoduché schéma obvodu mikrovlnného oscilátoru. Pokud jsou shodné velikosti negativní resistance diody a resistance oscilátoru, osciluje obvod bez útlumu, a tím je vyzařována spojitá elektromagnetická vlna. [ROSTAMI a kol., 2010]



Obrázek 11 Gunn dioda – VA charakteristika, konvertor. [LEE, 2009]

Pro vytváření nízkoenergetického záření o frekvencích vyšších než 500 GHz, se nejčastěji využívá nelineární reaktivní multiplikace nízkofrekvenčního oscilátoru. V dnešní době je nejčastěji používán zdroj vzestupného směšování z mikrovlnných frekvencí (20-40GHz). Frekvenční multiplikování mikrovln je koncepčně stejné jako harmonické generování optické vlny v nelineárním krystalu. Schottkyho diody plní ve frekvenčním multiplikátoru úlohu nelineárního činitele přeměňujícího přichodící mikrovlny na své harmonické vlny. V Schottkyho diodě je využíváno spojení kovu a polovodiče známého jako Schottkyho bariéra. Velmi vysoká frekvence spínání (nad 10 GHz) je způsobena velmi vysokou vodivostí kovového kontaktu. V triplikátoru vyrobeném z jednoho kusu na GaAs struktuře je obsažena sada Schottkyho diod. Toto zařízení obsahuje přijímací a vysílací anténu, vstupní a výstupní vlnovod a obvod pro generaci harmonického signálu. Generování třetí harmonické je závislé na optimálním návrhu tvaru a rozměrů součástí

obvodu.



Obrázek 12 Triplikátor s obvodem Schottkyho diod. [LEE, 2009]

THz Polovodičový zářič pracuje při pokojové teplotě a s úzkým pásmem. Při frekvenci 1 THz dosahuje průměrného výstupního výkonu typicky v rozsahu 10-100 μ W. [LEE, 2009]

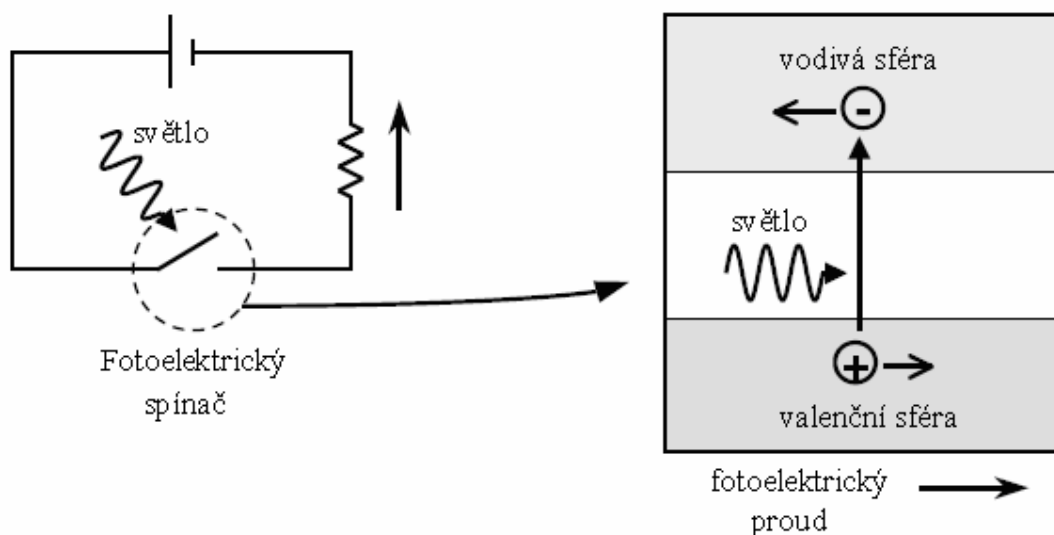
Zařízení jako Gunn, IMPATT a TUNNETT, využívající vyšší frekvence až 200GHz, jsou zatím ve vývoji, a doposud nejsou komerčně dostupné. Oproti tomu pokrok ve vyvíjení MMIC (monolitický mikrovlnný integrovaný obvod) v polovodičové skupině III-V rozšířil oblast základního frekvenčního pásma až na 200 GHz. K převedení mikrovlnného pásma na THz pásmo je vyžadována vícenásobná multiplikace. Multiplikátory s vícenásobnou multiplikací mají oproti zdvojovači nebo triplikátoru čtyřikrát menší účinnost konverze. Uspořádáním série nízko řadových multiplikátorů dostaneme nejefektivnější zdroj THz záření. Jako zdroj multiplikování je nejčastěji využívána GaAs Schottkyho bariérová dioda instalovaná do jednovidového vlnovodu. Tzv. „Řetěz“ multiplikátoru dosahují 1200 GHz se 75 μ W při pracovní teplotě 120 K a při pokojové teplotě nad 250 μ W. Touto technikou můžeme dosáhnout signálů až do 2.7 THz. Tato technika je neustále ve vývoji. [ROSTAMI a kol., 2010]

1.1.5 Foto-elektricky vodivé spínání

Pro vysílání a detekci THz záření se často využívá fotoelektricky vodivé (PC) antény, ve tvaru dipólu. [ROSTAMI a kol., 2010]

Tato anténa je elektrický spínač, který využívá vzrůstu elektrické vodivosti v polovodiči a izolantu při vystavování světelnému záření. Fotoelektrická vodivost vzniká při zvýšení počtů volných nosičů (elektronů) a děr (fotonů). K tomu, aby byla překročena spodní hranice vodivosti materiálu, musí být vytvořena značně velká fotonová energie. [ROSTAMI a kol., 2010]

Na obrázku (Obrázek 13) můžeme vidět jednoduchý obvod s PC spínačem a rezistorem. Ve chvíli, kdy jsou světlem vytvořeny volné elektrony a díry, je umožněno protékání proudu obvodem.



Obrázek 13 Fotoelektrický spínač. [LEE, 2009]

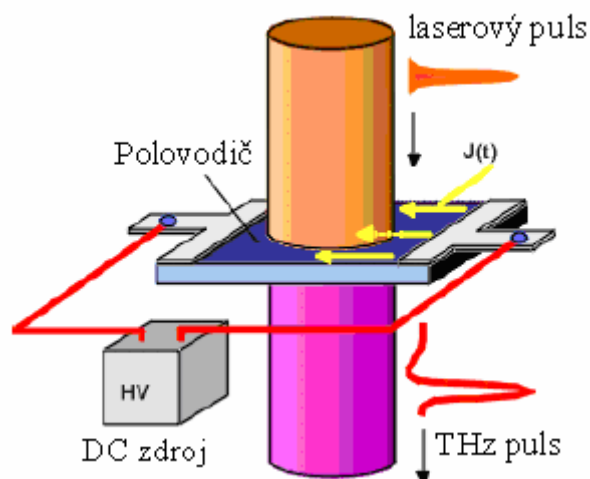
Pro vytvoření nebo detekování THz záření je třeba, aby se proces spínání v PC anténě odehrával v časech menších než 1 ps. Spínání v určitých časech je funkcí počtu pulzů laseru a času rozepínání, jenž je dán hlavně dobou životnosti nabuzeného nosiče v polovodičovém substrátu antény. [GAVENDA, 2011] A tak je důležitou vlastností ultra rychlého fotoelektricky vodivého spínání, hustota krátkých laserových pulzů s nízkou životností nosičů. Také při používání velmi kvalitních fotoelektricky vodivých materiálů je žádoucí vysoké průrazné napětí a vysoká pohyblivost nosičů. [LEE, 2009]

Pro PC spínače se testovala řada fotoelektricky vodivých materiálů jako: galium, arsenid při nízké teplotě (LT-GaAs), zářením narušený silikon na safíru (RD-SOS), chromem nasycený galium arsenid (Cr-GaAs), indium fosfát (InP) a amorfni silikon. [GAVENDA, 2011]

Pro výrobu THz vysílačů a detektorů se nejčastěji používá RD-SOS a LT-GaAs jejichž životnost nosičů je nižší než 1 ps. Délka životnosti je odvislá od vysoké koncentrace defektů, jimiž jsou nosiče zachovány a rekombinovány. V RD-SOS jsou defekty tvořeny O⁺ ionty vzniklými při „iontovém bombardování“. Jejich hustotu můžeme řídit množstvím iontových implantátů. LT-GaAs zvětšíme epitaxi molekulárního paprsku při nízké teplotě substrátu (kolem 200°C). Po nárůstu následuje prudké zchlazení. V daném materiálu je obsažena vysoká hustota defektů, jako As atomy v mřížce nacházející se na místě Ga (As intersticiální atomy a Ga vakance). Pokud je materiál LT-GaAs zahřátý na teplotu 180 až 240°C, jeho životnost nosičů je pak menší než 1 ps. Nejkratší životnosti 0,2 ps dosáhneme ohřevem na teplotu kolem 200°C. [LEE, 2009]

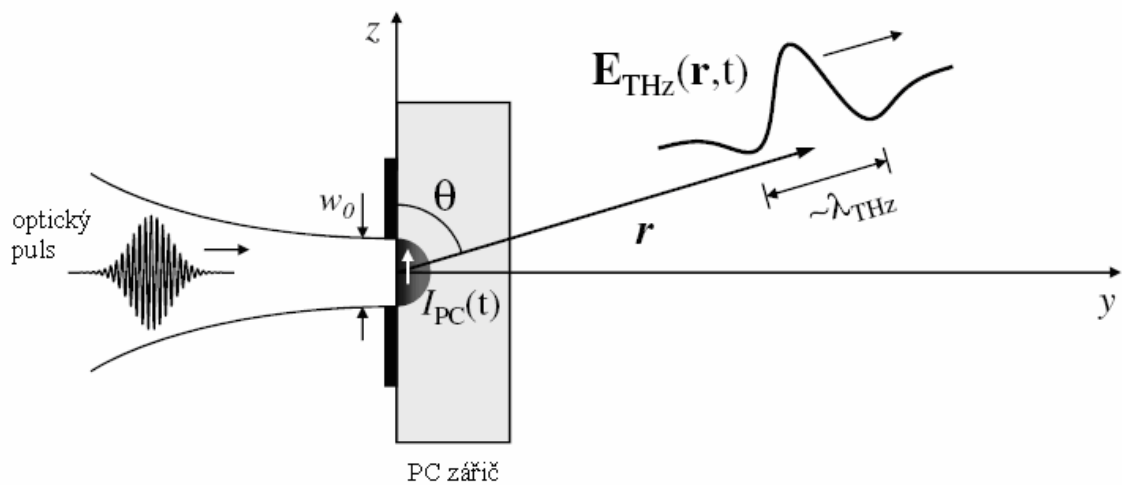
Ozářením fotoelektricky vodivé antény femto-sekundovým laserem můžeme vytvořit THz pulzy s periodou menší než 1 ps. THz vysílač se skládá z polovodičového základu (substrátu), na kterém jsou nanášeny dvě kovové elektrody, jimiž je přivedeno stejnosměrné napětí. V prostoru mezi elektrodami jsou vytvářeny páry elektron a díra femto-sekundovými optickými pulzy s fotonovou energií větší než je spodní hranice vodivosti polovodiče. Volné elektrony jsou následně urychlovány statickým napěťovým polem a zároveň klesá hustota nábojů tím, že jsou nosiče zachyceny v defektivních místech v době konce životnosti. [LEE, 2009]

Statickým napěťovým polem jsou urychlovány volné elektrony a zároveň při tom klesá hustota nábojů hlavně zachycováním nosičů v defektivních oblastech v momentě konce životnosti nosičů. Zrychlováním a ubýváním volných nosičů je vytvářen impulzní proud, který je zdrojem pulzů elektromagnetického záření, jež má periodu menší než 1 ps. [LEE, 2009]



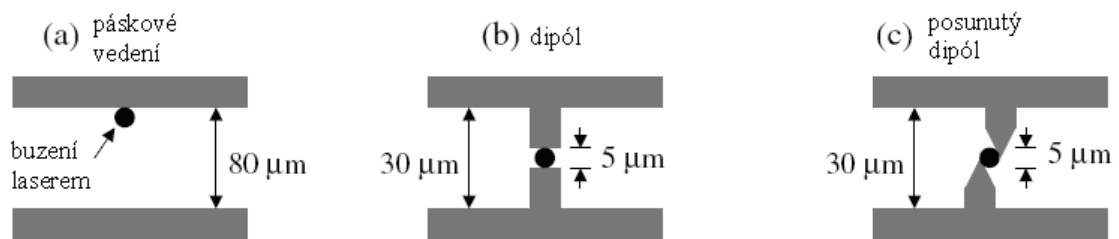
Obrázek 14 Nákres modelu PC antény. [GAVENDA. 2011]

Zdroj PC zářiče můžeme také tvarovat jako Hertzovu dipólovou anténu, jejíž velikost je několikrát menší, než je vlnová délka vytvořeného záření.



Obrázek 15 Schematické vyjádření principu PC antény. [LEE, 2009]

Pro vytváření kovových elektrod můžeme použít různé druhy struktur, čímž docílíme různých výkonů a šířek pásem THz záření z PC spínačů. Běžně používané struktury elektrod pro PC spínače jsou na obrázku (Obrázek 16).



Obrázek 16 Struktury elektrod PC antén. [LEE, 2009]

Pro rovnoběžné pásky je hustota pulzů menší než pro dipól. Spektrum amplitudy u rovnoběžných pásek dosahuje frekvence až 4 THz, která je částečně omezena časem detekční odezvy. Záření z dipólu má užší pásmo a dosahuje nižší frekvenční maximum, ale zároveň většího výkonu při stejném optickém budícím záření a SS napětí

Optimalizováním struktury elektrod můžeme vylepšit účinnost THz generování. Výkon na výstupu PC zářiče je závislý na napětí a výkonu optického budiče. Amplituda vyzařovaného pole se zvyšuje lineárně s nízkým výkonem optického budiče a slabým napěťovým polem. Maximální možný výkon získaného záření je omezen na velikost průrazného napětí materiálu substrátu. [LEE, 2009]

Shrnutí v bodech [VODOPYANOV, 2008]:

Výhody:

- vysoká kvalita v prostoru
- úměrná šířka pásma při časově rozlišené spektroskopii (kolem 2 THz)
- možnost regulace frekvence až do 2,5 THz

Nevýhody:

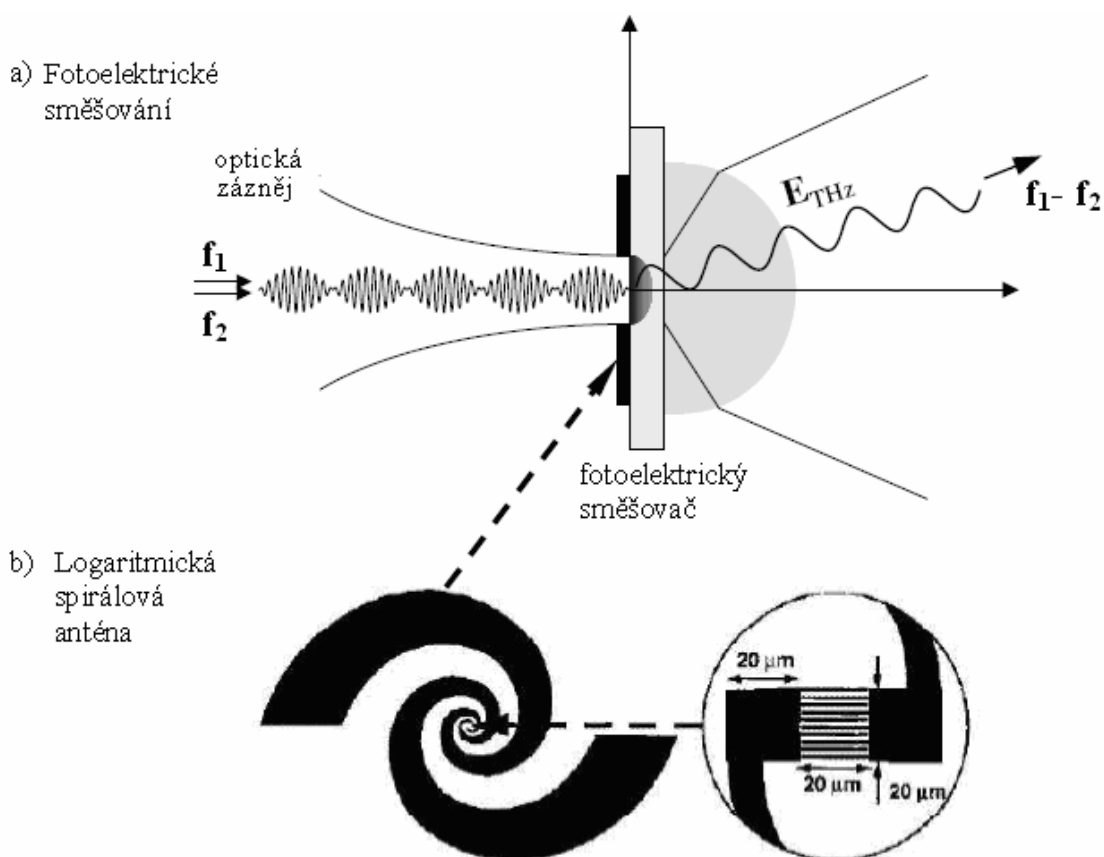
- malý THz výkon (v řádech μW při buzení 1 W laserem ultra-krátkých pulzů, stovky mW v maximu)
- docela komplikované z důvodu potřeby laseru ultra-krátkých pulzů
- vysoké pořizovací náklady
- prozatím rozměrné

1.1.6 Foto-elektrické směšování

Je také známo jako optická heterodynní sestupná frekvenční konverze.[GAVENDA, 2011] Jedná se o styl generování spojitého THz záření s foto-elektricky vodivým spínačem. Jedná se o kompaktní polovodičové zařízení. [LEE, 2009]

Princip foto-elektrického směšování je založen na generování spojitě vlny THz záření s využitím směšování dvou spojitých vln laserů se stejnou polarizací, jež je zaostřena na foto-směšovací zařízení. V dané metodě je využíváno prostorového překrývání signálů ze dvou laserů o frekvencích f_1 a f_2 k vygenerování THz paprsku. Kolineárním laserem je ozařován polovodič, u kterého dochází k nízkému teplotnímu nárůstu, což vede k použití velice rychlých, fotoelektricky citlivých diod s velice krátkou životností nosičů. Nízkou teplotou polovodiče je také umožněna vhodná pohyblivost optických nosičů. [ROSTAMI a kol., 2010]

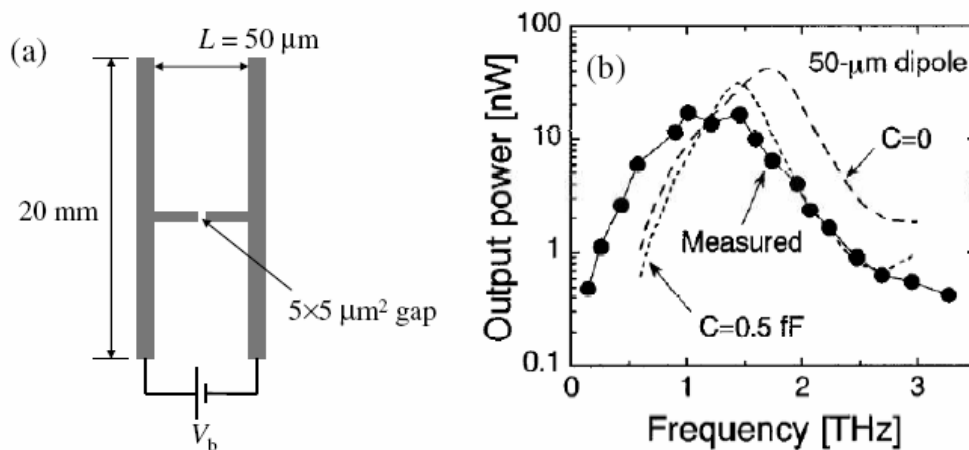
Obrovského rozsahu ladění můžeme dosáhnout jen vysoce kvalitním, laditelným, dvou frekvenčním laserovým systémem. Nevýhodou dané metody je, že v porovnání s dalšími metodami vytváření spojitého THz záření, je výstupní výkon relativně nízký. Účinnost sestupné konverze z optických vln na terahertzové je 10^{-6} - 10^{-5} , standardní výkon na výstupu se pohybuje v řádech mikrowattů. Z důvodu požadavku na vysokou pohyblivost a krátkou životnost nosičů se nejčastěji pro tuto metodu využívá materiál LT-GaAs. Přenos nosičů v LT-GaAs je podstatným činitelem ovládajícím proces foto-elektrického směšování. Jelikož k foto-elektrickému směšování je vyžadováno spojitě optické buzení, je pro maximální THz výstupní výkon omezeno snížením tepelné vodivosti LT-GaAs (kolem 15 W/mK). Obrázek (Obrázek 17a) znázorňuje princip vytváření spojitého THz záření při použití fotoelektrického směšování. Standardní foto-elektrický směšovač má kovovou anténní strukturu osazenou na vrstvě LT-GaAs jež je vytvořena na SI-GaAs substrátu. Na zadní straně substrátu jsou nasazeny silikonové hyperhemisferické čočky. Pro foto-elektrické směšování se běžně používá logaritmická unipolární spirálová struktura antény s do sebe zapadajícími tyčinkami, což je vidět na (Obrázek 17b). [LEE, 2009]



Obrázek 17 a) Fotoelektrické směšování, b) Logaritmická spirálová anténa.

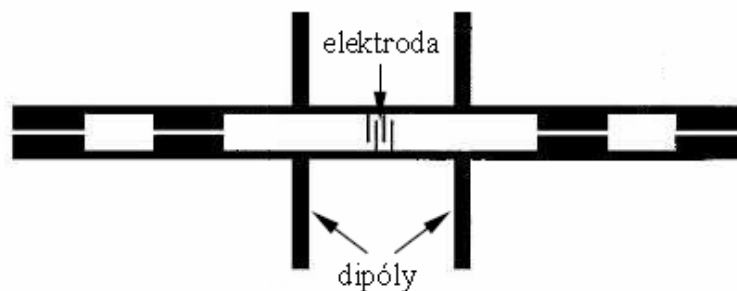
[GAVENDA, 2011]

Optické buzení pro foto-elektrické směšování využívá záznějů mezi dvěma spojitými laserovými paprsky, které se od sebe mírně liší frekvencí. Jako světelný zdroj se nejčastěji využívají diodové lasery využívající spektrální oblast mezi 800 a 850nm. THz záření získáme nastavením rozdílu mezi frekvencemi na frekvenční rozsah THz. I přes široký rozsah ladění má logaritmická spirálová anténa malý výstupní výkon, jelikož má poměrně nízký vyzařovací odpor. Výkon výstupního záření je možné zesílit použitím resonantní struktury antény. Strukturu dipólové PC antény a její spektrum záření v THz rozsahu můžeme vidět na obrázku (Obrázek 18), kde L značí vzdálenost rovnoběžných částí antény. [LEE, 2009]



Obrázek 18 a) PC anténní dipól, b) Graf závislosti výstupního výkonu na frekvenci pro PC anténu. [GAVENDA, 2011]

Větších výstupních výkonů můžeme dosáhnout lepším propracováním anténních struktur. Oproti jednoduché anténě má anténa s dvojitým dipólem (Obrázek 19) více symetrický charakter záření a vyšší vyzařovací odpor.



Obrázek 19 PC anténa s dvojitým dipólem. [LEE, 2009]

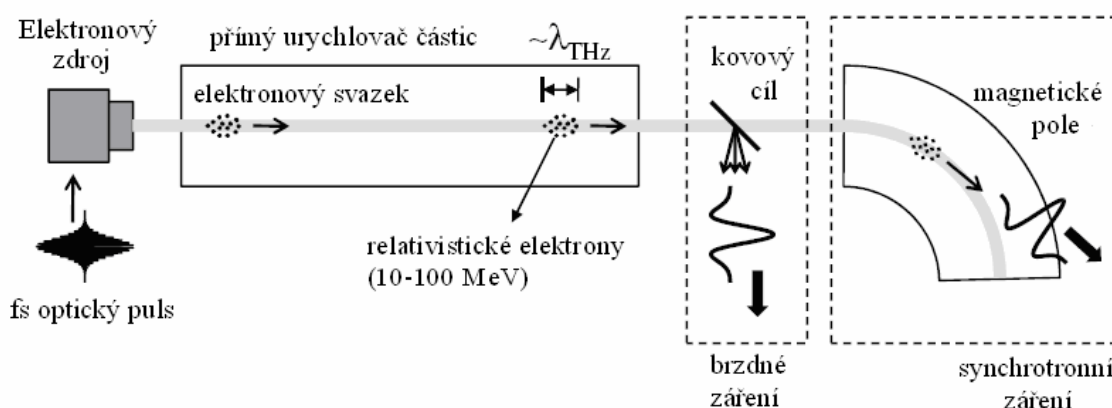
Hlavní vlastností antén s dvojitým dipólem je kapacita elektrod, kterou vyrušuje induktivním laděním, při délce pásů přechodu nastavené na rezonanční frekvenci.

A tak má na odpor záření hlavní vliv životnost nosičů. Výstupní spektrum logaritmické spirálové antény má v blízkosti její rezonanční frekvence značně menší výstupní výkon než výstup z antény s dvojitým dipólem. [LEE, 2009]

1.1.7 Elektronový urychlovač

Jedná se o výjimečný světelný zdroj charakteristický vysokým jasem a velkým rozsahem ladění. Výkon těchto zdrojů je o několik řádů vyšší než u ostatních THz zdrojů. Jeho

princip spočívá v urychlení relativistických elektronů, jimiž je vytvářeno záření tvaru úzkého kuželu v jejich směru rychlosti. Možnou metodou na vytvoření záření využívajícího vyšší rychlost elektronů je vystřelení paprsku elektronů směrem ke kovovému cíli, který značně zpomalí elektrony. Záření, které je tímto zpomalením vytvořeno, bývá nazýváno „brzdné záření“. A záření, které je vytvářeno pomocí relativistického elektronu podstupujícího kruhový pohyb bylo nazváno synchrotronové, jelikož bylo poprvé sledováno v elektronovém synchrotronu. K vytváření pulzního záření bývá seskupováno mnoho elektronů a pak se s nimi manipuluje ve shlukcích. Pokud je vlnová délka záření srovnatelná s velikostí elektronového svazku, jsou emise jednotlivých elektronů ve fázi navrstveny a výsledný výkon vyzařování je roven druhé mocnině počtu elektronů. Tímto z elektronového svazku vznikne relativně velice výkonné koherentní THz záření, které obsahuje velké množství elektronů. [LEE, 2009]



Obrázek 20 Schéma THz zdroje - urychlovač částic. [LEE, 2009]

Elektronový zdroj se spouští pulzy z femto-sekundového laseru. Jako elektronový zdroj se pro vytváření svazků elektronů využívá buď foto-elektrického katodového elektronového děla, nebo metody využívající povrchu polovodičů. V urychlovači se zvyšuje relativistická energie elektronů na 10-100 MeV a následným vysláním svazku elektronů ke kovovému cíli, nebo „ohýbáním cesty“ elektronů magnetickým polem, je vygenerováno THz záření. Velice nadějným zdrojem pro širokopásmové THz záření je synchrotronový akumulární prsteneček. Jeho hlavním technickým nedostatkem pro generaci THz pulzů je stabilizování elektronového svazku v průběhu jednoho cyklu v akumulárním prstenci. [LEE, 2009]

Shrnutí výhod a nevýhod [VODOPYANOV, 2008]:

Výhody:

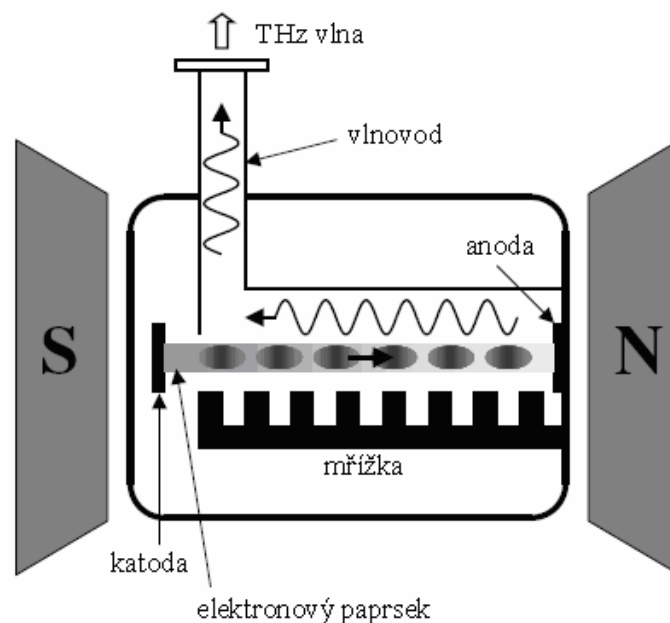
- velký výkon na výstupu (od W po kW)
- širokopásmový signál

Nevýhody:

- větší rozměry
- vysoká pořizovací cena

1.1.8 Oscilátor zpětné vlny

Nazývaný také karcinotron je jedním z historicky nejstarších THz zdrojů (60. let). Je založen na vytváření spojitě vlny THz záření ve frekvenčním rozsahu od 30 GHz do 1.4 THz. Řadí se k relativně velmi výkonným laditelným zdrojům monochromatického záření. [FEKETE, 2008]

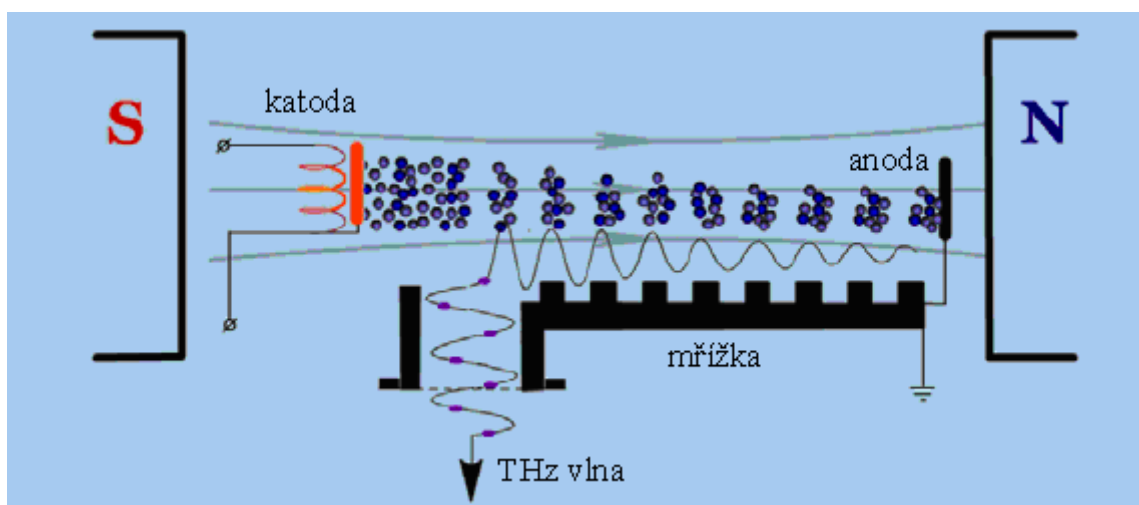


Obrázek 21 Schéma konstrukce oscilátoru zpětné vlny BWO. [LEE, 2009]

Je využíváno elektronového paprsku, který reaguje společně s elektromagnetickou vlnou v elektronové trubici. Elektrony jsou zpomalovány pomocí kovové mřížky ve tvaru hřebene a následně je jejich kinetická energie převedena na elektromagnetickou vlnu. Toto

zařízení bylo pojmenováno BWO, jelikož elektromagnetická vlna a elektronový paprsek se proti sobě šíří v opačném směru.

Elektrony, které vyzáří katoda, jsou urychleny pomocí SS elektrického pole mezi katodou a anodou. Směr elektronového paprsku udržují permanentní magnety. Opakující se mřížovou strukturou je vyvolána prostorová modulace podélného elektrického pole, čímž vznikne energetická modulace v elektronovém paprsku. Periodickým rušením jsou elektrony seskupeny do shluku, jehož následné šíření vybudí povrchové vlny o určité periodě. Pokud je rychlost elektronového paprsku rovna fázové rychlosti povrchové vlny, pak je kinetická energie elektronů koherentně převedena na elektromagnetickou vlnu. [GAVENDA, 2011] To znamená, že frekvence elektromagnetické vlny je určena rychlostí elektronů. A tak se frekvence ladí nastavováním napětí mezi elektrodami. V důsledku toho, že se skupinová rychlost povrchové vlny pohybuje v opačném směru od fázové rychlosti, je energie převedená na pole přesunuta a zesílena v opačném směru. Výsledné záření vychází z vlnovodu připojeného k dutině. [LEE, 2009]



Obrázek 22 Zobrazení principu BWO. [VODOPYANOV, 2008]

Shrnutí výhod a nevýhod [VODOPYANOV, 2008]:

Výhody:

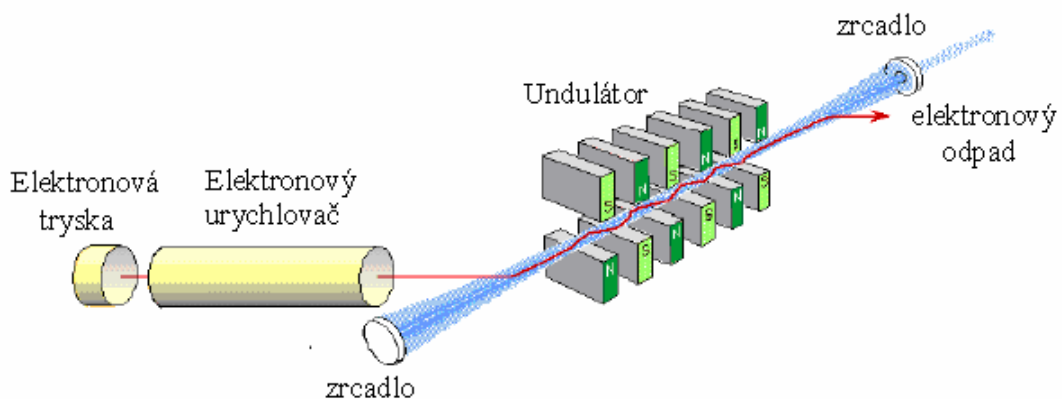
- nízká pořizovací cena
- monochromatický
- kompaktní
- jednoduše laditelný

Nevýhody:

- malý výstupní výkon (od μW po mW)
- jen pro malou frekvenci (pod 1 THz)

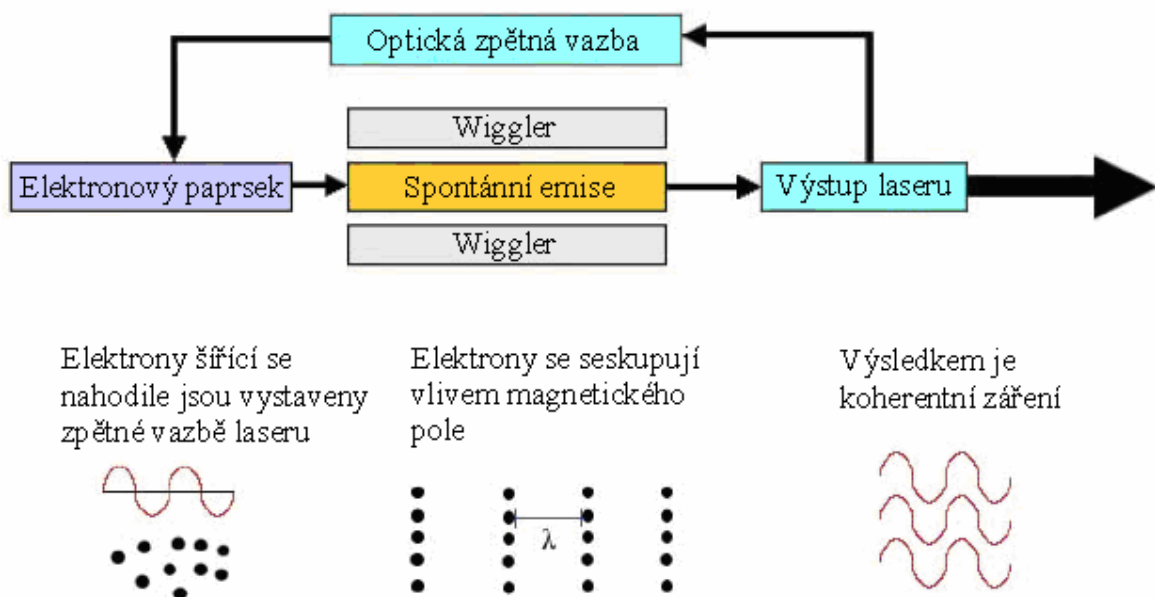
1.1.9 Laser volných elektronů (Free-electron laser – FEL)

Ve zkratce FEL využívá pro svou funkci relativistický elektronový paprsek procházející skrz wiggler (skupinu magnetů), jež byly navrženy k vytváření periodického příčného magnetického pole určeného ke generování koherentního elektromagnetického záření. V periodách se opakujícím magnetickým polem je zesilována sinusoidní oscilace elektronů, čímž vzniká monochromatické záření. [LEE, 2009]



Obrázek 23 Princip FEL. [VODOPYANOV, 2008]

Jedinečnou výhodou FEL zařízení je široký záběr pásem výstupního záření od MW až po rentgenové a taky jejich plynulé ladění. Vlnová délka výstupního záření je určována např. nízkou hustotou magnetů ve wiggleru, silou magnetického pole a energií elektronového paprsku. Těmito zařízeními je možno vytvářet záření velice vysokého výkonu, jelikož nemají potíže běžných vysoce výkonných laserů jako je únava materiálu nebo deformování optických zařízení působením tepla. Laserový paprsek periodicky modulovaný magnetickým polem tvořeným wigglerem se šíří v resonátoru společně s elektronovým paprskem. [VODOPYANOV, 2008]



Obrázek 24 Blokové schéma principu FEL. [GAVENDA, 2011]

Elektronový paprsek je seskupován při vzájemném působení záření do pole wiggleru, přičemž modulační perioda závisí na vlnové délce laseru. Toto seskupování je zásadní pro vytváření záření koherentně zesíleného. Laserový paprsek je zesilován synchronizací mezi elektronovou oscilací a radiačním polem vytvořením opakující se dráhy v resonátoru. [GAVENDA, 2011]

Shrnutí výhod a nevýhod [VODOPYANOV, 2008]:

Výhody:

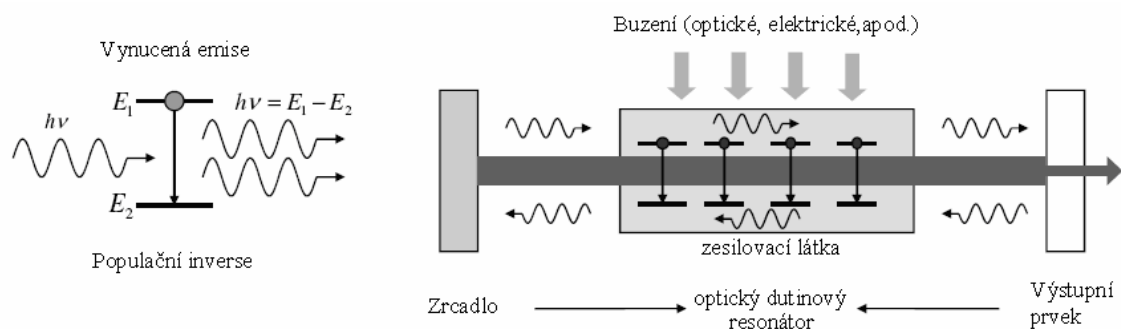
- široké rozpětí ladění
- velmi kvalitní prostorový a teplotní výstup
- velký průměrný a maximální výkon (v rozmezí desítek W až kW při průměrném výkonu a až jednotky W v maximu)
- využívá pulzního a spojitého signálu

Nevýhody:

- docela komplikovaný
- vysoké pořizovací náklady
- není přenosný z důvodu velikosti a potřeby zdrojů

1.1.10 Plynové lasery

THz plynový laser má podobnou základní strukturu konstrukce jako typické laserové systémy, jak můžeme vidět na obrázku (Obrázek 25). Kvůli udržení módů laseru je použit navíc vlnovod umístěný uvnitř dutiny v příčném směru. Jako zesilovací látky THz plynových laseru se využívá molekulárních plynů jako CH_3F , CH_3OH , NH_3 a CH_2F_2 . THz záření je vytvářeno v rotačních přechodech molekul. Jelikož mají molekuly neustále dipólové momenty, je jejich rotační přechod přímo připojen k elektromagnetickému záření přes působení dipólu. [LEE, 2009]



Obrázek 25 Schéma principu laseru, konstrukce. [LEE, 2009]

K vytvoření THz záření za pomoci plynového laseru bylo prozkoumáno velké množství chemických látek a bylo při něm získáno několik stovek laserových frekvencí v oblasti THz záření. Seznam THz frekvencí s nejvyššími výkony je zobrazen v tabulce (Tabulka 1). [LEE, 2009]

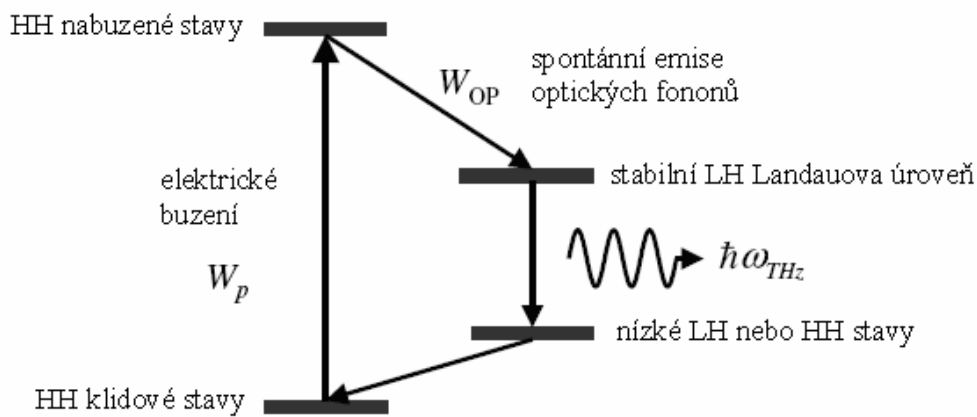
Frequency (THz)	Molecule	Output Power (mW)
8.0	CH ₃ OH	~10
7.1	CH ₃ OH	~10
4.68	CH ₃ OH	>20
4.25	CH ₃ OH	~100
3.68	NH ₃	~100
2.52	CH ₃ OH	>100
2.46	CH ₂ F ₂	~10
1.96	¹⁵ NH ₃	~200
1.81	CH ₂ F ₂	<100
1.27	CH ₂ F ₂	~10
0.86	CH ₃ Cl	~10
0.59	CH ₃ I	~10
0.525	CH ₃ OH	~40
0.245	CH ₃ OH	~10

Tabulka 1 THz frekvence získané z plynového laseru. [LEE, 2009]

1.1.11 P-typ germaniový laser

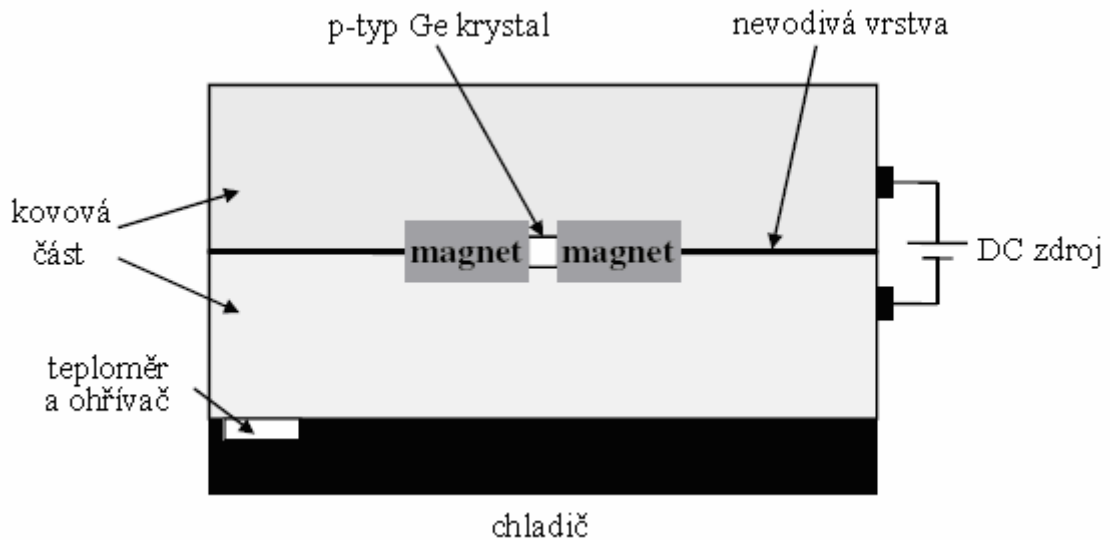
Jedná se o elektricky buzené polovodičové lasery, jejichž obvyklou příměsí je prvek berylium poskytující vysoké optické zesílení. Záření generované laserem se zakládá na pohybu proudu a populační inverzi horkých nosičů v P-typu germaniových krystalech. Tyto krystaly jsou obklopeny zkříženým elektrickým polem s magnetickým.

THz fotony mohou být vytvářeny mezi dvěma děrami podnícením přechodu Landauových úrovní. Je využíváno pohybu nabitých částic v pohybujících se v kruhu s cyklotronovou frekvencí úměrnou síle pole v magnetickém poli. Protože nabité částice mají pouze omezený prostor, může kvantová mechanická energie nabít pouze úrovně diskretních hodnot. Tyto diskretní úrovně energie bývají označovány jako Landauova úroveň. [LEE, 2009]



Obrázek 26 Schématické vyjádření energií populační inverze v p-typu Ge. [LEE, 2009]

Populační inverze je docílena komplikovanými přechody uvnitř pásma mezi stavem lehkých a těžkých děr při nízké teplotě (pod 40 K). Převládající mechanismus rozptylování děr v p-typu Ge v těchto kryogenických podmínkách je spontánní emise optických fononů. Při použití dostatečně silného elektrického pole se volně zrychlí díry na úroveň energie optického fononu. Toto má za následek vyzáření optického fotonu a následný přechod na nižší energetický stav. Tomuto jevu se říká pohyb proudu. Určitý počet těžkých děr (HH – heavy holes) je rozptýlen do pseudo stabilních Landauových úrovní v oblasti lehkých děr (LH light hole). Dané pseudo-stabilní stavy jsou vytvářeny při zkříženém elektrickém poli s magnetickým. Akumulace pohybu těžkých děr v pseudo-stabilní LH způsobí populační inverzi stabilní Landauovy úrovně a úrovně s nižší energií. Na obrázku (Obrázek 26) je zobrazen proces populační inverze v p-typu Ge krystalu při aplikaci zkříženého elektrického a magnetického pole. [LEE, 2009]



Obrázek 27 Konstrukce p-typ Ge THz laseru. [LEE, 2009]

Kryogenickou teplotu krystalu (pod 40K) udržuje tzv. chladicí pás. Energie pulzu bývá typicky několik μJ a opakují se po několika μs . Průměrný výstupní výkon dosahuje až několik jednotek W. Změnou síly elektrického a magnetického pole je možné plynule ladit frekvenci od 1 do 4 THz. [LEE, 2009]

Shrnutí výhod a nevýhod:

Výhody:

- možnost laditelnosti od 1,5 do 4 THz
- vyšší výkony (W)

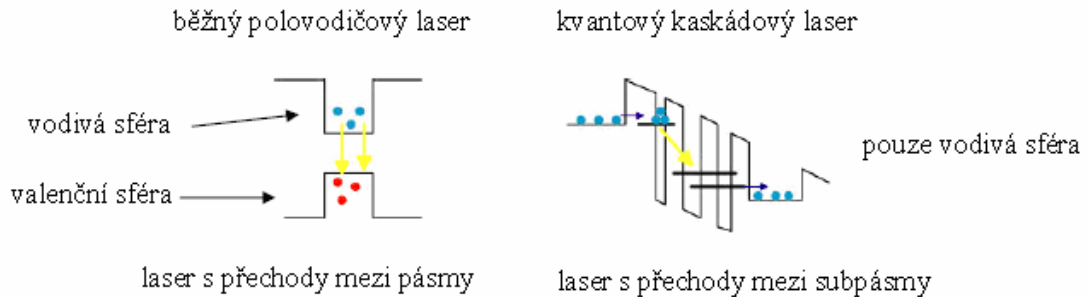
Nevýhody:

- malá pracovní teplota (kolem 10K), potřebné kryogenné chlazení
- vyžaduje silné elektrické a magnetické pole

1.1.12 Kvantový kaskádový laser

Jelikož energie fotonů běžných polovodičových laserů nedosahuje u těchto zdrojů úroveň vodivé sféry polovodiče, tak je není možné použít pro generování THz záření. Řešením je využití zařízení s kvantovým jevem v polovodičích, které využívají přechod mezi sub

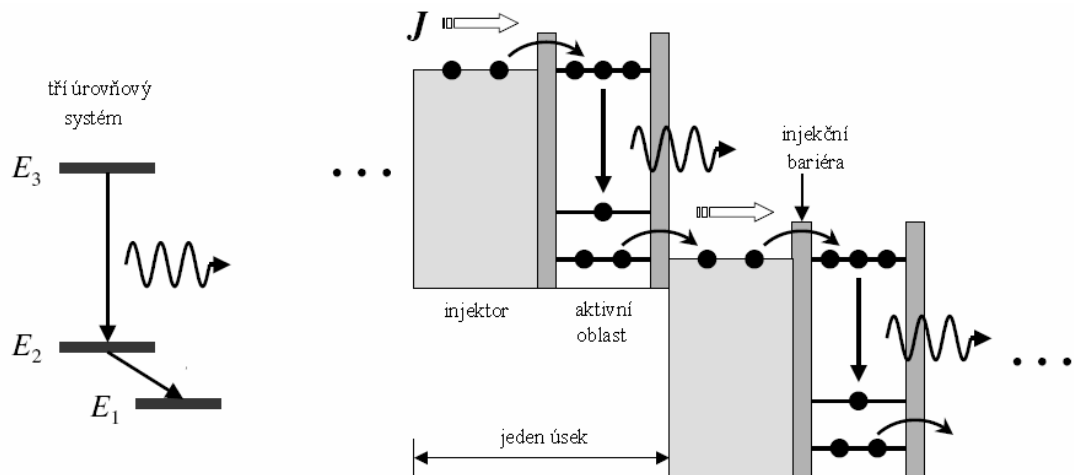
pásmy.



Obrázek 28 Rozdíl mezi běžným a kvantovým kaskádovým laserem. [LEE, 2009]

Tento typ laseru je složen z různých typů struktur polovodičů. Hetero-struktura kvantových kaskádových laserů (QCL) je složena z mřížky pravidelně se měnících úrovní odlišných polovodičů. Vnější napětím je vyvolán přechod mezi dvěma pseudo odlišnými stavy v super mřížce, což má za následek emisi THz záření. K základním principům QCL patří dva nepostradatelné procesy kaskádování a přechod mezi sub pásmy. Oproti běžným polovodičům, kdy je emitována rekombinace párů elektronů a děr, vyžadují přechod mezi sub pásmy pouze elektrony (unipolární proces). V QCL podstupuje elektron přechod mezi jednotlivými sub-pásmy v jednom úseku super-mřížky (úseky se opakují), následně je elektron zaveden do dalších úseků, kde se podrobuje dalším sub-pásmovým přechodům. Proces přechodů probíhá až do doby, kdy elektron dosáhne konce super-mřížky. Pozoruhodné je, že se kaskádového procesu netýkají běžná omezení kvantové účinnosti, resp. jeden elektron umožňuje vytvoření mnoha fotonů. [LEE, 2009]

Oblasti vývoje THz QCL se týkají dvě zásadní omezení. Prvním je hodně nízká energie THz fotonu 4,1 meV, což může mít za následek, že tepelné záření zamezí vytváření elektronu a také populační inverzi, jež je nezbytná pro laserové vyzařování v QCL. Výstupní výkon QCL dosahuje při teplotě kapalného helia záření 100mW, a velice rychle klesá s narůstající teplotou. V současné době je nejvyšší pracovní teplotou QCL kolem 180K. **Druhé omezení** se týká obtížnosti udržení módů laseru v malém rozsahu díky velké vlnové délce THz záření. Je nutné udržení módu, jelikož vynucená účinnost emise odpovídá intenzitám světla použitého v zesilujícím médiu. Není možné používat dielektrické vlnovody standardních polovodičových laserů pro THz QCL, z důvodu mnohem větší hloubky pohlcení zanikající vlny než je velikost aktivní oblasti. Podstatnými komponenty THz QCL jsou kovové vlnovody i přes jejich velké ztráty.



Obrázek 29 Princip kvantového kaskádového laseru. [LEE, 2009]

Jeden z bloků struktury super mřížky v QCL se skládá z injekční bariéry, aktivní oblasti a z injektoru. Vznik záření je způsoben přechodem mezi sub-pásmi v aktivní oblasti, který obsahuje mnohonásobné kvantové propasti. Činnost typického QCL je založena na třech úrovních. Mezi úrovněmi 3 a 2 vzniká populační inverze. Statickému napětí elektrického pole je vystavena struktura super mřížky. Napětí je nastaveno pro kaskádový proces tak, že úroveň 1. aktivní oblasti je vyrovnána s úrovní 3. navazujícího úseku struktury. Elektron, který byl použit v jedné aktivní oblasti, jsou opět využity v dalším cyklu. Pro efektivní činnost laseru je nezbytná rozsáhlá populační inverze. Proto je nezbytně nutné, aby bylo účinné injektování do vyšších úrovní a rychlé uvolnění nižších úrovní. [LEE, 2009]

Shrnutí výhod a nevýhod. [GAVENDA 2011]:

Výhody:

- kompaktní s relativně nízkou cenou
- účinnost (kolem 5%), při vyloučení chladících prvků
- umožňuje nastavit vlnovou délku kolem 3 THz
- dosahuje průměrného výkonu

Nevýhody:

- omezené možnosti ladění jednoho zařízení
- potřeba kryogenní pracovní teploty (k dosažení výstupního výkonu v mW je potřebná teplota menší než 50 K)
- není žádná účinná metoda k dosažení vyšší účinnosti

1.2 Terahertzové detektory

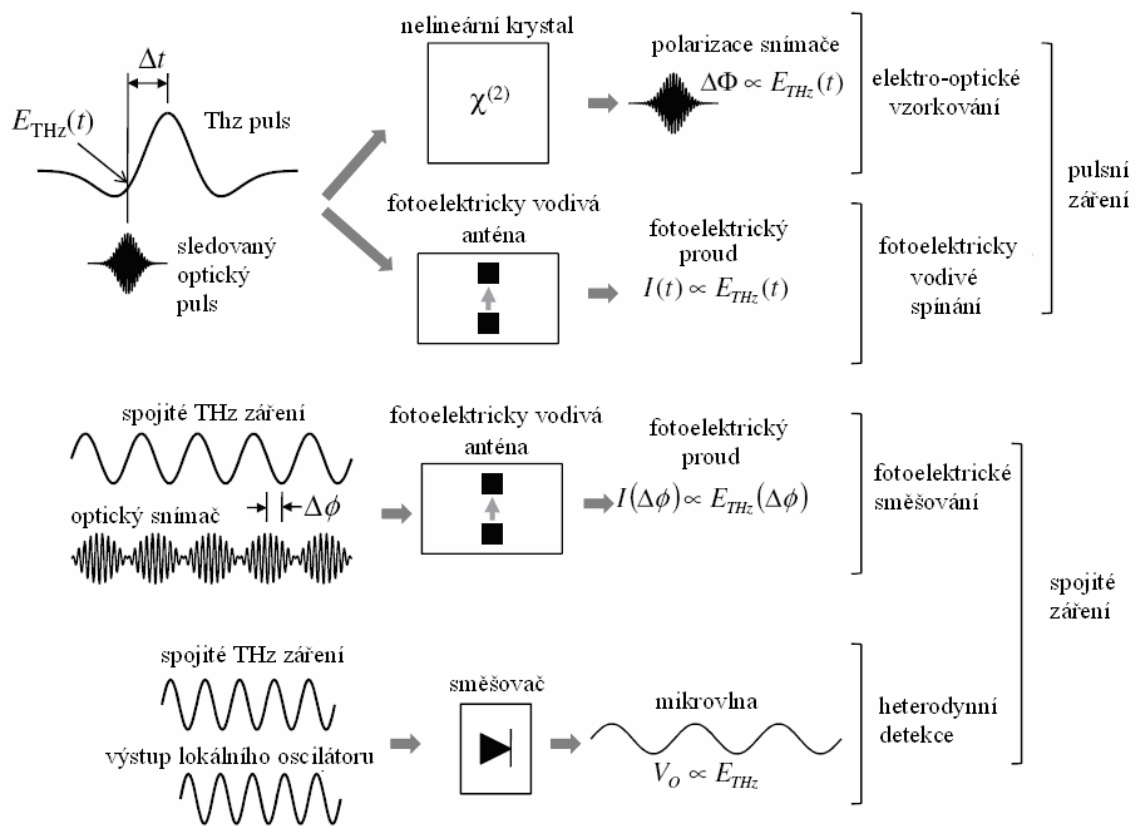
Metody THz detekování bývají převážně rozdělovány na technologie koherentní a inkoherentní. Rozdíl mezi těmito technologiemi spočívá v tom, že inkoherentní detekování využívá měření intenzity, zatímco koherentní detekování používá měření amplitudy a fáze pole. Metoda koherentní detekce je ve své základní podstatě úzce spjata s technikou generování. Především metody optické využívají pro generování a detekování stejné světelné zdroje.

1.2.1 Koherentní detektor

Standardně využívané metody koherentní detekce jsou zobrazeny na obrázku (Obrázek 30). **Elektro-optické (EO) vzorkování** ve volném prostoru probíhá měření stávajícího elektrického pole širokopásmového THz pulzu v časech daných Pockelsovým jevem. Tento jev úzce souvisí s optickou rektifikací, která vytváří dvojlom v nelineárním optickém krystalu THz pole, jež odpovídá poli amplitudy. Celá vlna je složena z měření, s použitím slabého optického snímacího signálu, polem navozeného dvojlomu jako funkce relativního zpoždění mezi THz a optickým pulzem. [LEE, 2009], [GAVENDA, 2011]

Při **snímání PC anténou (fotoelektricky vodivém spínání)** jsou měřeny širokopásmové THz pulzy v určitých časech. THz pole vyvolá proud ve foto-elektricky vodivé mezeře při absenci napětového pole a v případě, že snímacími optickými pulzy budou vytvořeny fotoelektrické nosiče. Proud fotoelektricky indukovaný je úměrný k amplitudě THz pole. Během doby kdy dochází ke změně časové prodlevy mezi snímacím optickým zářením a THz pulzem je zaznamenán tvar THz pulzu v daném čase. Tento tvar se zjistí měřením foto-elektrického proudu. [LEE, 2009]

Kombinovaným nastavením širokopásmového THz generování a detekování jsou měřeny změny amplitudy a fáze THz pulzů vyvolaných vzorky. V těch je obsažen dostatek informací pro určení absorpce a rozptylu vzorku. Daná metoda bývá označována jako časově rozlišená spektroskopie, neboli THz-TDS. [LEE, 2009]



Obrázek 30 Vyobrazení metod koherentní THz detekce. [LEE, 2009]

Fotoelektrické směšování pomocí fotoelektricky vodivého spínání měří spojité THz záření. Fotoelektrický proud v tomto případě představuje závislost sinusoidy na relativní fázi mezi zázněji optického signálu a THz zářením. [LEE, 2009], [GAVENDA, 2011]

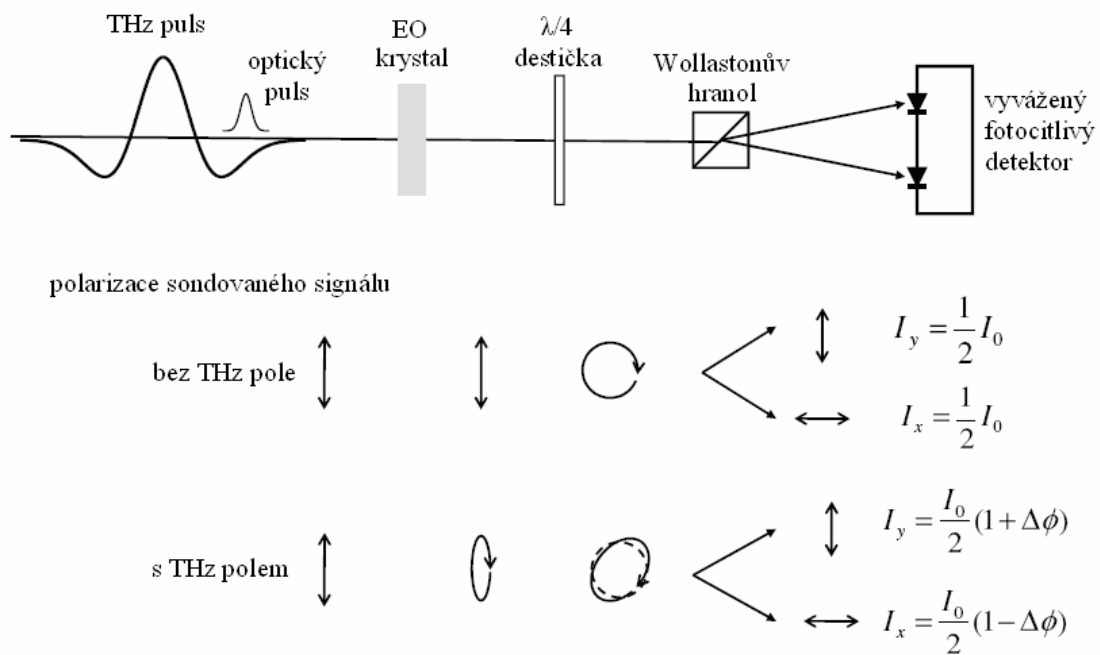
Při **heterodynní detekci** se využívá nelineární zařízení nazývané směšovač. Jako směšovač se nejčastěji využívají Schottkyho diody. Frekvenční sestupná konverze je klíčovým procesem ve směšovači. Vzniká při směšování referenční hodnoty záření o konstantní frekvenci s THz signálem f_{THz} . Ze směšovače vychází výstupní signál s rozdílovou frekvencí nazývanou jako střední frekvence, $f_{ST} = f_{THz} - f_R$. THz amplituda je úměrná amplitudě výstupního signálu. Obvykle se heterodynní detekce používá pro detekování nekoherentního záření na rozdíl od optických metod. [LEE, 2009]

Tepelné snimače jsou běžně používanými inkoherentními detektory. Patří k nim bolometr, Golayova buňka a pyroelektrické zařízení. Základním stavebním článkem každého tepelného detektoru je pohlcovač záření napojený na chladič. energii záření zaznamenává teploměr, který měří teplotní nárůst v pohlcovači. Každý tepelný detektor je význačný tím jak měří nárůst teploty. Pro bolometry se využívá elektrický odporový teploměr

zkonstruovaný ze silně dopovaného polovodiče jako je Si, nebo Ge.[GAVENDA, 2011] Standardně bolometry pracují při kryogenní teplotě. U pyroelektrického detektoru je měněno teplo na elektrickou polarizaci pomocí pyroelektrického materiálu. V Golayově buňce se nachází menší množství plynu v utěsněné komůrce za pohlcovačem. Při zvýšení tlaku je deformována membrána, kdy tuto deformaci monitoruje měřič optické odrazivosti. Tento tepelný detektor reaguje na záření velice široké spektrální oblasti. Jelikož musí pohlcovač k měření teploty docílit rovnováhy této teploty, je jeho detekční odezva relativně pomalá ve srovnání s typickými světelnými detektory. [LEE, 2009]

1.2.1.1 Elektro-optické vzorkování ve volném prostoru

Při elektro-optickém (EO) vzorkování je ve volném prostoru měřeno stávající elektrické pole THz pulzu v časovém rozmezí určeném nejen amplitudou, ale i fází s vysokou přesností. Pockelsův efekt v elektro-optických krystalech je základním principem EO vzorkování. Tento efekt je úzce spjat s optickou rektifikací, což můžeme vidět v podobnostech mezi nelinearitami polarizací druhého řádu. Stejných koeficientů optických nelinearit Pockelsova efektu jako u optické rektifikace docílíme použitím bezztrátového materiálu. Statickým elektrickým polem je způsoben v nelineárním optickém poli dvojlom úměrný k amplitudě [LEE, 2009]

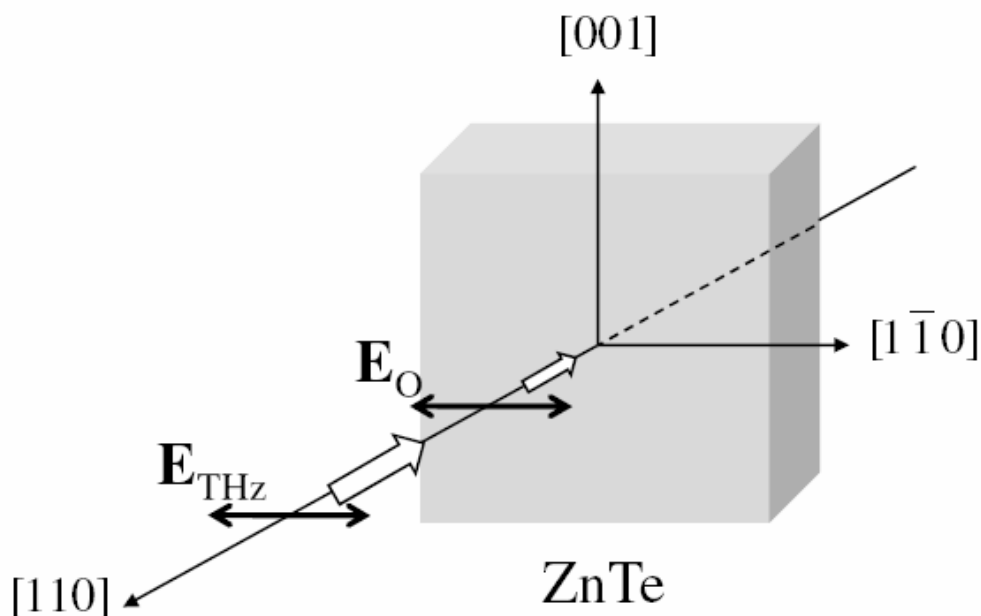


Obrázek 31 Blokové schéma elektro-optického vzorkování ve volném prostoru.

[GAVENDA, 2011]

Obrázek (Obrázek 31) zobrazuje standardní schéma EO vzorkování pro měření dvojlomu vytvořeného elektrickým polem. Pro šíření optických pulzů je ideální, když rychlost skupiny těchto pulzů je úměrná THz fázové rychlosti v EO krystalu. Potom jsou během šíření optické pulzy ovlivněny konstantním elektrickým polem THz pulzu. Vývoj polarizace sledovaného pulzu v několika krocích polarizace s THz polem nebo bez něj, můžeme vidět ve spodní části obrázku (Obrázek 31). Mezi tím, co prochází THz pulz a lineárně polarizovaný optický pulz skrz EO krystal, je elektrickým polem nasměřovaným dvojlomem vytvářena slabá eliptická polarizace sondovaného pulzu. Ta se vyvíjí většinou kruhově, ale po průchodu skrz $\lambda/4$ destičku se vyvíjí elipticky. Snímaný paprsek se rozštěpí pomocí Wollastonova hranolu na dvě kolmé složky, které jsou následně vyslány na vyvážený detektor. Ten měří rozdíl mezi dvěma kolmými složkami sledovaného pulzu, který odpovídá amplitudě THz pole. [LEE, 2009]

Mezi užitečné vlastnosti ZnTe pro THz generování patří docílení rychlosti kolem 800nm, pak vysoká průhlednost optických a THz frekvencí, a vysoký EO koeficient. Návrh optické a THz polarizace pro EO vzorkování můžeme vidět na obrázku (Obrázek 32). Elektrickým polem vytvořený dvojlom je maximalizován, v případě paralelní orientace THz elektrického pole a optické polarizace k osám $\langle 110 \rangle$ orientovaného krystalu. [LEE, 2009]



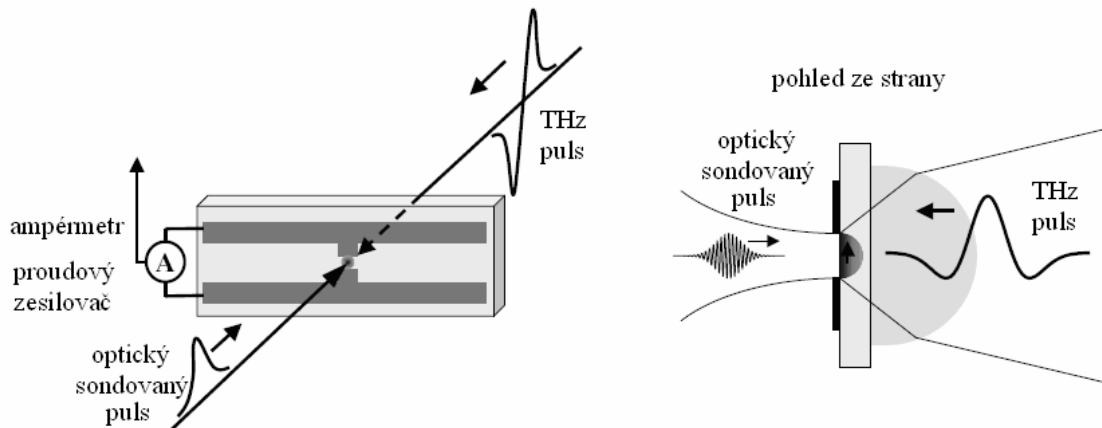
Obrázek 32 ZnTe <110> orientovaný krystal. [LEE, 2009]

Při optické frekvenci je nelineární polarizace kolmá na příslušné optické pole. Toto pole naznačuje, že lineární polarizace opticky snímaného signálu se vytváří v eliptické polarizaci přes šíření v ZnTe pod vlivem THz pole. Pro teplotně nebo spektrálně rozlišené EO vzorkování v praxi platí tři omezující faktory: rozptyl nelineární susceptibility, výsledná hustota pulzů u sledovaných optických signálů a záměna mezi shlukem optických pulzů a THz fázovou rychlostí. [LEE, 2009]

1.2.1.2 Foto-elektricky vodivá anténa

THz generování v PC zářiči je převážně shodné se základním principem detekce THz pole v PC anténě. Konstrukce časově rozlišeného měření THz elektrického pole s PC přijímačem je zobrazena na obrázku (Obrázek 33). Při absenci napětového pole, a pokud jsou do fotoelektricky vodivé mezery přiváděny fotoelektrické nosiče opticky snímaného pulzu, je THz polem indikován v této mezeře proud. Fotoelektrický proud je závislý na velikosti životnosti nosiče, která by neměla být nižší než je hustota THz pulzů u časově rozlišeného měření tvaru vlny. Na amplitudě pole THz záření, které je zaměřeno na fotoelektrickou vodivou mezeru, je závislý vyvolaný fotoelektrický proud. Typický fotoelektrický proud se pohybuje v řádech nA, proto je k měření nutný proudový zesilovač.

Pokud se zvětší odstup signálu od šumu, je signál zpracován pomocí synchronního zesilovače s modulátorem optické intenzity, kdy se využívá přerušovače optického paprsku. [LEE, 2009]

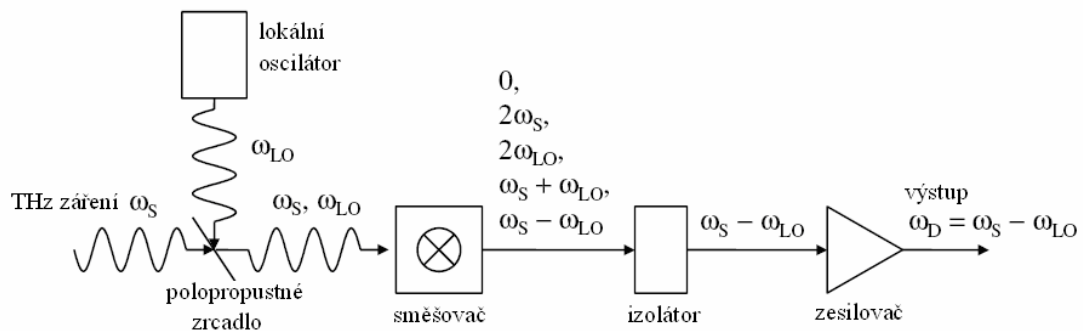


Obrázek 33 PC anténní přijímač. [LEE, 2009]

PC přijímače jsou omezeny určitými frekvencemi. Na frekvenci je závislá velikost bodu zaměřeného THz paprsku na straně detektoru, kvůli rozptylu paprsku. Z toho plyne, že s nižší frekvencí je slabší intenzita pole na detektoru. Pro nízké frekvence je funkce rozptylu úměrná frekvenci. [LEE, 2009]

1.2.1.3 Heterodynní detekování

Je založeno na sestupné frekvenční konverzi v nelineárním zařízení dosažené při směšování signálu referenčního záření se signálem s konstantní frekvencí. Princip této detekce je analogií k fotoelektrickému směšování a generování s využitím rozdílové frekvence. Předpokládá se, že nelineární zařízení („směšovač“) je charakteristické kvadratickou nelinearitou. Výstupní signál obsahuje pět frekvenčních komponent pro signální a referenční záření. [LEE, 2009]



Obrázek 34 Schéma heterodynního detektoru. [LEE, 2009]

Na obrázku (Obrázek 34) můžeme vidět cestu signálu u standardního heterodynního detektoru. Mezi jednu z nejzákladnějších komponent se řadí lokální oscilátor (LO), jenž vytváří referenční záření. Výkon na výstupu LO má zásadní roli při určování výkonu detektoru. Pro oblast záření 0,1 až 1 THz se standardně využívají polovodičové zářiče jako LO a pro oblast 1 THz plynové lasery. Výhodou heterodynních detektorů je možnost rozlišení spektra světla, buď snímáním výstupní frekvence LO anebo měřením signálu spektrálním analyzátozem. Ten má spektrální rozlišení převážně dané velikostí spektrální čáry LO, kdy se může měřit spektrum za podmínky, že šířka pásma záření spadá do rozsahu ladění LO. [LEE, 2009]

Pro heterodynní detekci je dalším základním prvkem směšovač s nelineární charakteristikou. Pro spektrální oblast pod 1 THz se nejčastěji jako směšovač používá Schottkyho dioda. Schottkyho směšovač má docela malou citlivost a je pro něj požadován LO s malým výkonem (mW). Mezi nejcitlivější směšovače v oblasti kolem 1 THz patří kryogenický detektor stejně tak jako elektronový bolometr. Elektronový bolometr požaduje velice nízký výkon (kolem 10nW) LO díky jeho vysoké citlivosti. Běžně využívaný elektronovým bolometrem je indium antimonit (InSb) detektor. Pro elektronové bolometry se nejčastěji jako detekční materiál používá niobium (Nb) a niobium nitrid (NbN) v supravodivé fázi. [GAVENDA, 2011] K dosažení veliké detekční šířky spektra je nutná krátká doba tepelné relaxace. U bolometrů s Nb a NbN je využito rozdílného chladicího prostředí. [GAVENDA, 2011] Tenký film NbN je známý svým velice krátkým časem tepelné relaxace (pod 10 ps), takže NbN bolometr používá vnitřní fononové chlazení. V případě že je čas tepelné relaxace Nb příliš veliký, pak Nb bolometr využívá velmi

krátký a tenký Nb proužek ke zjednodušení difúzního chlazení. U obou supravodivých bolometrů se snižuje čas teplotní relaxace na pár desítek piko-sekund. Pak šířka detekčního pásma pro supravodivý elektronový bolometr je v rozmezí několika GHz. [LEE, 2009]

1.2.2 Teplotní detektor

Využívá se běžně ke snímání spojitého THz záření, řadí se k nim bolometr, Golayův článek a pyroelektrický prvek. Hlavním stavebním prvkem teplotního detektoru je pohlcovač záření napojený na chladič. Energie záření absorbovaná pohlcovačem je převedena na teplo, jímž je vytvořen teplotní nárůst, který je měřen teploměrem. Vzhledem k tomu, že je nízká tepelná kapacita pohlcovače, tak působení tepla v něm způsobuje ostré teplotní změny. Tepelný detektor je významný specifickým způsobem snímání rozdílu teplot mezi pohlcovačem a chladičem. Výsledná vyzařovaná energie pohlcovače je odečtena pomocí měření výstupu. [LEE, 2009]

Bolometry mají elektrický odporový teploměr, který měří teplotu pohlcovače záření. Nejčastěji se teploměr vyrábí ze silně dopovaného polovodiče např. Si, nebo Ge, kdy se využívá vlastností těchto materiálů kdy je jejich elektrický odpor citlivý na teplotu. Bolometr patří mezi kryogenické detektory, kdy pro zachování vysoké detekční citlivosti musí pracovat při teplotě nižší nebo rovné teplotě tekutého helia. V pyroelektrických detektorech je využíváno pyroelektrického materiálu, v němž způsobuje teplota změny v elektrické polarizaci, čímž upravuje konstantu dielektrika. Zásadním prvkem těchto detektorů je kondenzátor s obsahem pyroelektrického materiálu. Při změně teploty detektoru přeskočí elektrický náboj mezi elektrodami. Změna teploty je určena měřením toku proudu, který vzniká k tomu, aby vyrovnal vzniklé napětí na svorkách kondenzátoru. U Golayouva článku je pohlcovač záření tvořen počerněným tenkým filmem naneseným na substrát. Teplota je převáděna na nízké množství plynu v uzavřené komůrce za pohlcovačem, čímž vzrůstá tlak v komoře. Na zadní stranu komory je připevněna odrazivá a pružná membrána. Deformace membrány je detekována měřením optického odrazu. [LEE, 2009]

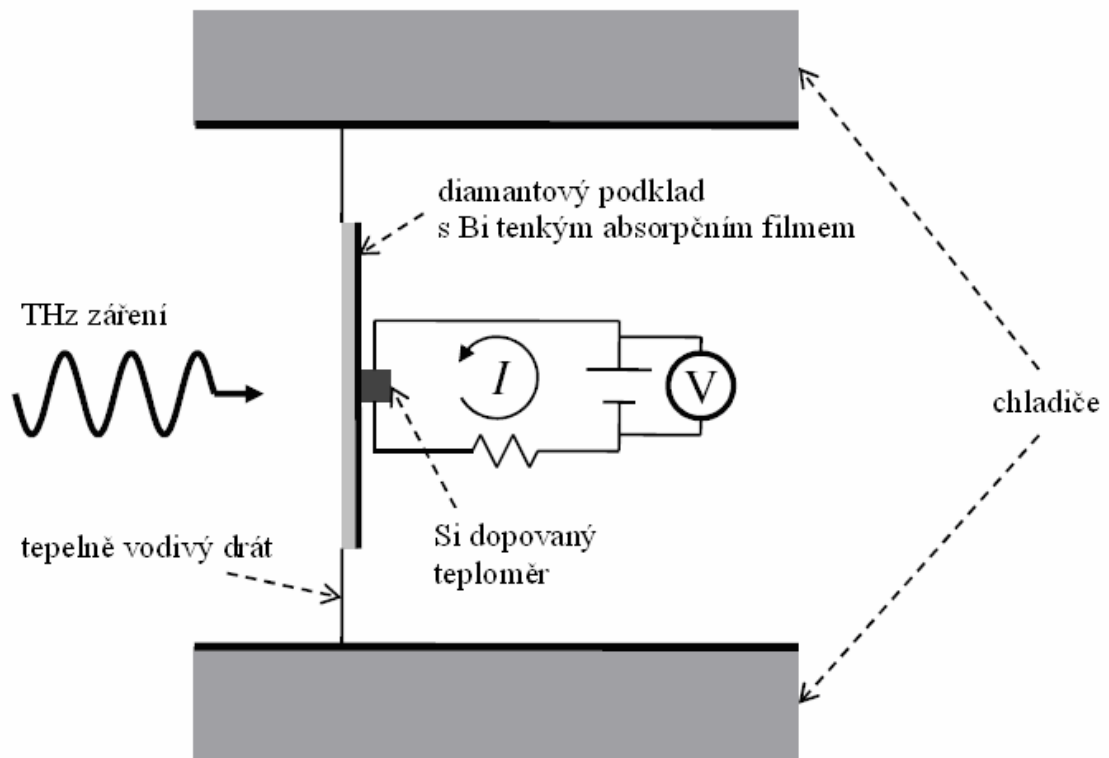
Obvyklá vlastnost teplotního detektoru je, že reaguje na záření velké šířky spektra, čehož není možné dosáhnout s většinou fotonových detektorů. Na druhou stranu jsou teplotní detektory velice pomalé v porovnání s typickým fotonovým detektorem, jelikož před započítím měření záření musí pohlcovač docílit teplotní rovnováhy. Typický čas pro jedno

měření bolometrem je kolem 0.1 ms při teplotě kapalného helia. Golayův článek a pyroelektrický detektor pracuje s konstantou 1s při obvyklé teplotě okolí. Z důvodu silného ovlivňování okolní teplotou je pro THz detekci vyžadováno speciální opatření kompenzující vliv prostředí. Běžně využívaným výkonným způsobem je rozlišování žádaného THz záření od pozadí signálu, čehož můžeme dosáhnout modulací intenzity daného THz paprsku a měřením postupných změn výstupního signálu. [LEE, 2009]

1.2.2.1 Bolometr

Je to detektor teploty využívající materiálu s elektrickou resistencí citlivou na teplotní změny. Při potřebě dosažení vysoké citlivosti bolometru je třeba snížit pracovní teplotu na teplotu rovnou nebo nižší než je teplota tekutého helia. Detekování pomocí bolometru je jednou z nejcitlivějších metod detekování THz vln. Můžeme jím měřit celou šířku spektra od THz po rentgenové záření. [LEE, 2009]

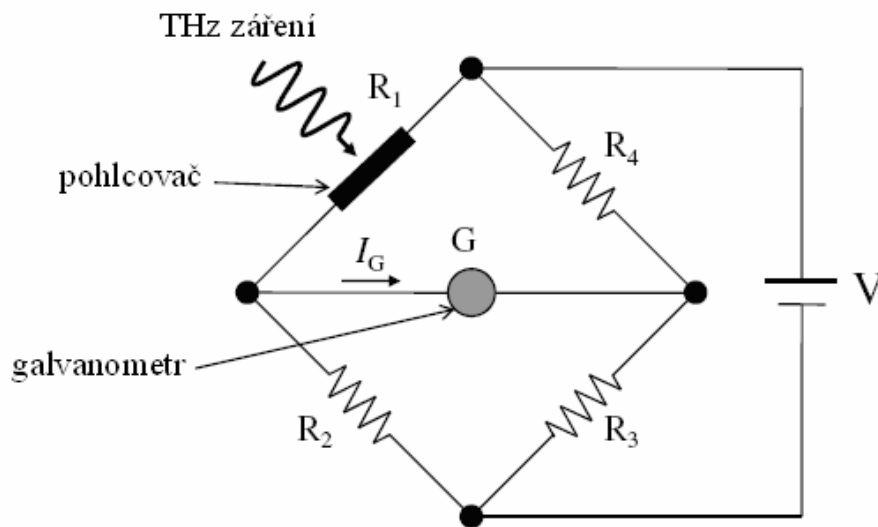
V případě oddělení komponent pro klíčové operace v bolometru je zařízení označováno jako složený bolometr. Nicméně jsou tyto typy bolometrů výkonnější, jelikož můžeme kteroukoliv funkci bolometru nastavit nezávisle na ostatních. Na obrázku (Obrázek 35) můžeme vidět klíčové komponenty typického složeného bolometru a jejich pracovní nastavení. [LEE, 2009]



Obrázek 35 Schéma bolometru. [LEE, 2009]

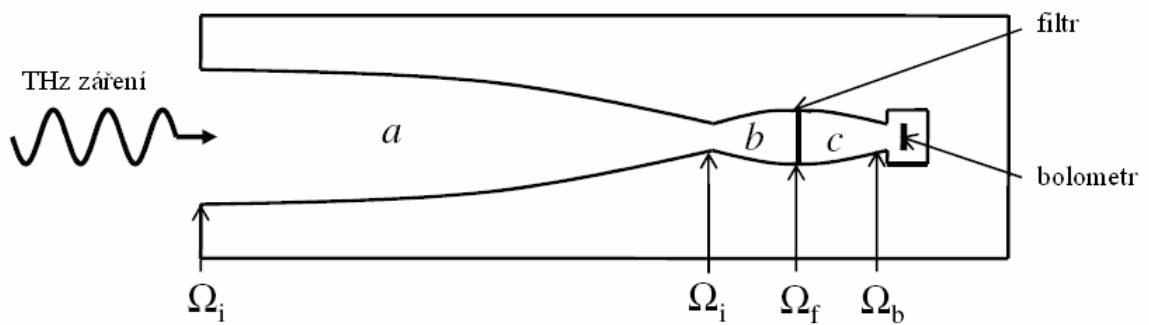
Zařízení je složeno z pohlcovače záření uloženého na substrátu a teploměru, jenž udává změny elektrické resistance vzniklé změnami teplot substrátu. K substrátu je připojen pomocí tepelně vodivých drátů chladič obsahující Dewarovu nádobu s tekutým heliem, která má udržet detektor na kryogenické teplotě. Energie záření vstřebaná pohlcovačem je přeměněna na teplo, čímž je zvednuta teplota pohlcovače a zároveň i teploměru. Zvyšování teploty má za následek změnu resistance teploměru, která je zjištěna změnou hodnoty procházejícího elektrického signálu. Na obrázku (Obrázek 36) je znázorněn jednoduchý obvod k snímání teplem sledovaného proudu. Funkci jednoho z rezistorů Whetsonova vyváženého můstku plní pohlcovač záření. [LEE, 2009]

Při změně resistance pohlcovače způsobené zářením, se dostane můstek do nerovnovážné polohy a přes galvanometr projde proud. U některých typů bolometrů se využívá vyrovnávacího pohlcovače na protější straně můstku. Tímto pohlcovačem jsou kompenzovány vlivy vnějšího záření a tak je udržována rovnováha můstku. [LEE, 2009]



Obrázek 36 Zapojení bolometru do Wheatsonova můstku. [LEE, 2009]

U kvalitních pohlčovačů záření je téměř stejná odezva skrz celé spektrum s vysokou schopností pohlcovat a s nízkou tepelnou kapacitou. Nejpodstatnější je tepelná vlastnost substrátu, kdy je nejvhodnější vysoká tepelná vodivost a malá tepelná kapacita. Standardní vysoce účinné pohlčovače a současně substráty obsahují tenké kovové filmy nanesené na tenkém nevodivém substrátu. Nejčastěji používaným materiálem pro pohlčovač je Bi, pro jeho docela nízkou vodivost, vysokou schopnost absorbovat záření a velice nízkou tepelnou kapacitu. Za nejvhodnější materiál pro substrát je považován diamant pro jeho skvělou tepelnou vodivost a vysokou průchodnost THz zářením pod 30 THz. Taktéž velice dobrou tepelnou vodivost a průchodnost pod 10 THz má safír. Teploměr je tepelně spojen s pohlčovačem a zároveň i se substrátem. Nejčastěji používaným materiálem pro teploměry je silně dopované Ge, nebo Si. Pomocí dopování se materiál svými vlastnostmi přibližuje rozmezí mezi kovem a izolantem. Pak elektrická rezistence při kryogenické teplotě není dostatečně nízká, ale zároveň citlivá na jakékoliv změny teploty. [LEE, 2009]



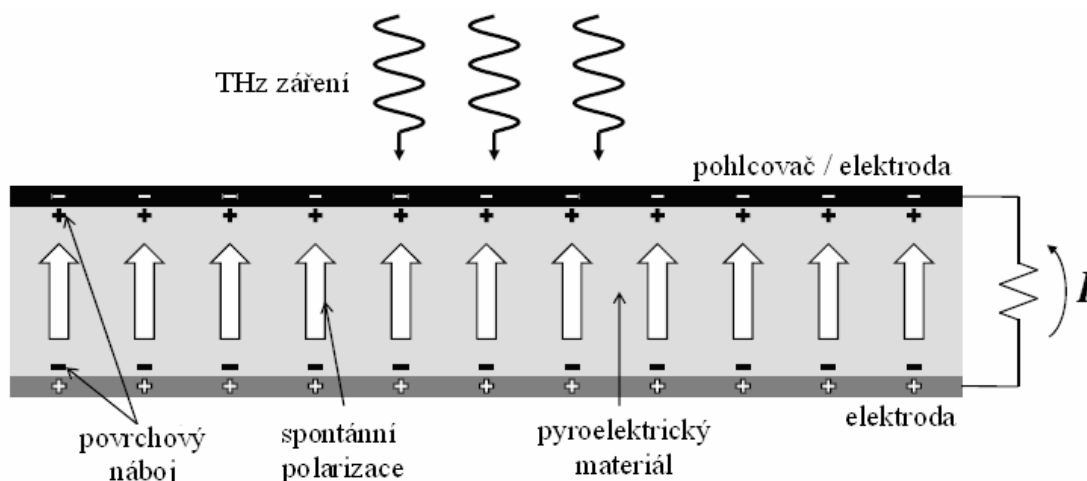
Obrázek 37 Vlnovod s Winstonovými koncentrátory. [LEE, 2009]

Při nutnosti zvýšit citlivost detekce je zapotřebí zkrátit plochu pohlcovače. Zaostřit THz paprsek na pohlcovač je ve volném prostoru velmi složité pro jeho relativně velkou vlnovou délku porovnatelnou s velikostí pohlcovače. K zlepšení vlastností přírodních THz vln využívají některé bolometry mnohavidový vlnovod. Pro maximální prostorový úhel bývá používán především Winstonův koncentrátor světla. Obrázek (Obrázek 37) znázorňuje strukturu vlnovodu se začleněnou skupinou Winstonových koncentrátů. Úhel „a“ je využíván pro přijímání vstupu a odfiltrování pozadí. Úhel „b“ je využíván ke zvýšení účinnosti filtrování a úhel „c“ k porovnání osy paprsku s osou pohlcovače. [LEE, 2009]

1.2.2.2 Pyroelektrický detektor

Pyroelektrický krystal bývá polarizován spontánně z důvodu, že každá elementární část krystalu je složena z permanentního elektrického dvoupólového momentu ve směru se specifickou osou krystalu. Spontánní polarizací je charakterizována většina krystalických tříd (10 z 32 krystalických tříd jsou pyroelektrické). V případě, že je možnost převrátit póly vnějším elektrickým polem, pak se materiálu říká feroelektrický. Veškerý feroelektrický materiál je pyroelektrický, ale ne opačně. Nezávislá elektrická polarizace v pyroelektrickém materiálu bývá citlivá na změnu teploty a tomuto fyzikálnímu jevu se říká pyroelektricitá.

Standardně se pro pyroelektrické detektory používají materiály, jako triglycyrin sulfát (TGS), druhotný triglycyrin sulfát (DTGS), lithium tantalát (LiTaO_3) a barium titanát (BaTiO_3). Pyroelektrické detektory TGS a DTGS jsou při THz frekvencích citlivější než ostatní detektory. [GAVENDA, 2011]



Obrázek 38 Struktura pyroelektrického detektoru. [LEE, 2009]

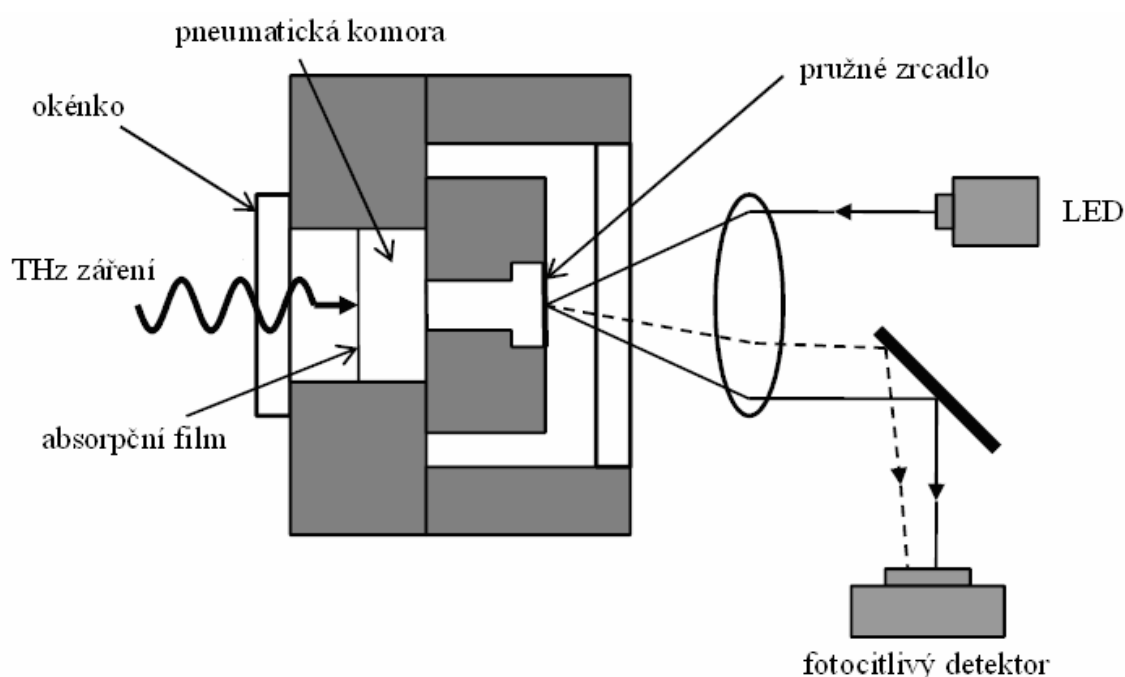
Při spontánní polarizaci vznikají náboje na povrchu, které neutralizují volné nosiče tvořící stabilní stav. Vyvažování nábojů je klíčovým procesem pro detekci THz záření. Obrázek (Obrázek 38) zobrazuje základní strukturu pyroelektrického detektoru. Pro určování povrchu krystalu k pohlcování určitých spekter THz záření se využívá řezu pyroelektrického krystalu kolmo na jeho polarizační osy, který je následně vložen mezi dvě elektrody (pro lepší pohlcení záření bývají načerněny). Následně se sleduje, zdali je daný pyroelektrický materiál průchodný při potřebné THz frekvenci. Teplem vytvořeným patřičným zářením je zvedána teplota pyroelektrického krystalu, což má za následek snížení nezávislé polarizace a zároveň povrchových nábojů. Elektrody, které jsou připojeny na protějších stranách povrchu krystalu, čímž vytváří kondenzátor. V případě, že je obvod uzavřen, prochází přes něj proud pro srovnání změn v nábojích povrchu. [LEE, 2009]

1.2.2.3 Golayův článek

Je detektorem záření pro širokou oblast záření od milimetrových vln až po IR vlny. Dokáže rozeznat záření o úrovni energie $10 \mu\text{W}$ a menší. Na obrázku (Obrázek 39) jsou vyobrazeny základní části a princip Golayova článku. Vytvořené THz záření prochází přes absorpční filtr kde je pohlceno. Pohlcenou energií záření je zahříván menší objem plynu uzavřeného v pneumatické komoře, čímž se vyvolá tepelná expanze plynu. Vzniklý tlak deformuje pružné zrcadlo připojené na zadní části komory. Směrem na pružné zrcadlo je vyslán

optický paprsek z LED, jehož odraz je nasměrován na fotoelektrický detektor. Výstupním detekčním systémem je snímána odchylka způsobená deformací membrány.

Ideálně by měly být pro Golayův článek použity následující komponenty. Pro absorpční film látka, jež vykazuje změny tepla. K tomu je nutné, aby materiál pro okénko a pneumatickou membránu byly tepelnými izolanty vysoké kvality, pak by procházelo plynem záření celého detekčního spektra. Pro snadnou dostupnost a nízkou tepelnou vodivost se využívá plyn xenon. [LEE, 2009]



Obrázek 39 Schéma Golayova článku. [LEE, 2009]

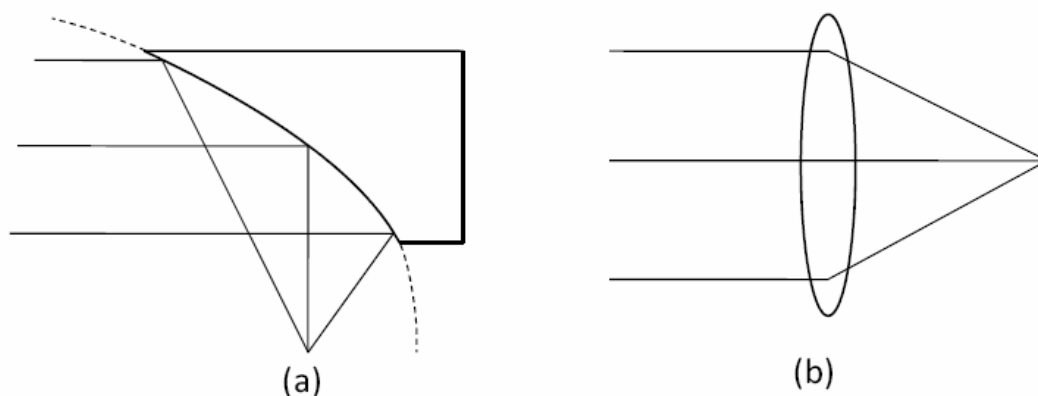
Golayův článek je nejcitlivějším teplotním detektorem záření, jenž pracuje při pokojové teplotě. Při modulační frekvenci pár desítek Hz je odezva Golayova článku v rozmezí kV/W . [LEE, 2009]

1.3 Terahertzová optika

1.3.1 Zrcadla a čočky

Nejčastěji se k zaostření a kolimaci¹ THz paprsku používá mimoosého parabolického zrcadla ve stylu odříznuté části z paraboloidu (Obrázek 40). Bývá pokryt běžně dostupnými kovy, jako je hliník nebo zlato z důvodu jejich téměř 99% odrazivosti v oblasti THz spektra. Hlavní výhodou konvenčních optických odrazových prvků je jejich nízká ztráta odrazem a absorpcí. Pracují také bez spektrální odchylky ve velké spektrální oblasti včetně optické. Parabolická zrcadla, nezávislá na sférických odchylkách, seskupují paralelní paprsek do jediného bodu, nebo šíří záření z jediného bodu, vytvořené velice přesným zdrojem. [LEE, 2009]

Substrátová čočka, směrová čočka a hyper-hemisférická čočka se používají především k odebrání záření z vysílače na bázi fotoelektrické vodivosti, a které je směrováno na přijímač. Pro THz čočky jsou vhodnými materiály jako nízkoztrátový polymer, dielektrikum a polovodič. THz čočky běžně prodávané pro obecné účely bývají vyrobeny ze silikonu, polyetylenu, teflonu a Tsurupici². [LEE, 2009]

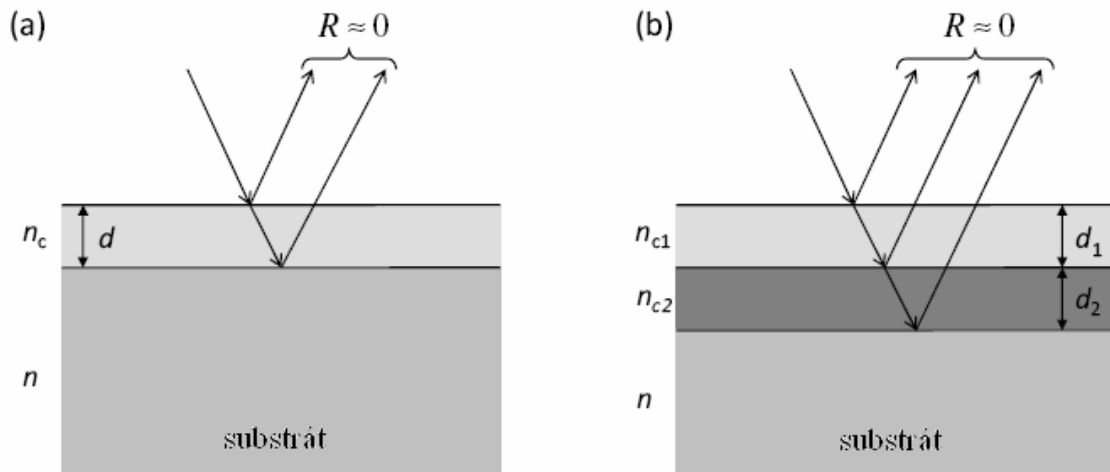


Obrázek 40 a) Parabolické zrcadlo, b) čočka. [LEE, 2009]

¹ Kolimace – je proces seřizení zrcadel dalekohledu tak, aby odrazem světla od obou vznikl ostrý obraz. [Kolimace dalekohledu, 2004]

² Tsurupica – (Terahertz Super Lens), vyvinuto Tera-Photonics Research Team Photo-Dynamics Research Center at RIKEN

Nejhlavnějším důvodem ztrát v THz optickém systému jsou Fresnelovy ztráty neboli ztráty odrazem. Je to zapříčiněno tím, že větší část nízkoztrátových dielektrik a polovodičů používaných pro THz prvky mají v oblasti THz relativně velké indexy lomu. Pro snížení Fresnelových ztrát se používají antireflexní povrchové úpravy.

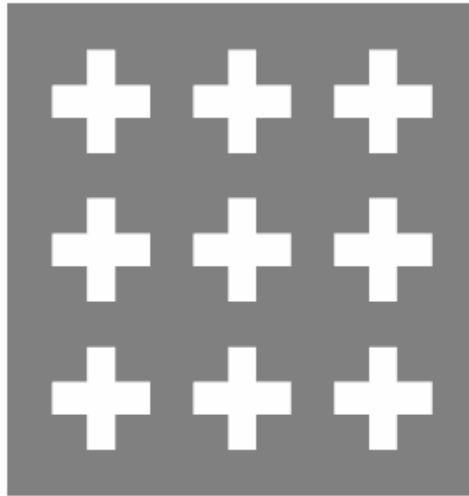


Obrázek 41 a) jednovrstvá, b) dvouvrstvá antireflexní povrchová úprava. [GAVENDA, 2011]

Obrázek (Obrázek 41) ukazuje jednovrstvou a vícevrstvou antireflexní povrchovou úpravu. Antireflexní povrchová úprava používá destruktivní interferenci mezi odrážejícími vlnami z jednotlivých úrovní. [LEE, 2009]

1.3.2 Pásmový filtr

V THz oblastech se využívá tenké kovové mřížky jako pásmového filtru. U mřížkových filtrů jsou optické vlastnosti založeny na pohybování povrchových plasmonových polaritonů na rozmezí kovu a dielektrika. Působením elektromagnetické vlny na kovovou mřížku je vyvolávána elektromagnetická indukce ve tvaru pole, jež je vyvoláno pohybem povrchových nosičů v uzavřené smyčce mřížky. V tu stejnou chvíli je měněno šíření náboje v čase určeném amplitudou pole, fází a polarizací. [LEE, 2009]



Obrázek 42 Pásmový filtr. [LEE, 2009]

1.3.3 Vlnovod

Jedná se o zařízení využívané k přenosu elektromagnetických vln z jednoho místa na jiné s malými ztrátami v intenzitě. Pro rádiové a mikrovlnné vlnovody se nejčastěji používá dutá kovová trubka. V oblasti optiky se využívá optického kabelu. Pro šíření THz záření byla zkoumána řada mikrovlnných a optických vlnovodů. Hlavním problémem pro THz vlnovody je docela velká absorpce u většiny konvenčních vlnovodů, čímž zabraňuje přenosu THz vln na dlouhé vzdálenosti. [LEE, 2009]

Do THz optických komponentů je možné vřadit polarizátory, které jsou obvykle tvořeny mřížkou z drátů a vlnových destiček, které jsou využívány k řízení stavů polarizace záření. [LEE, 2009]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

2 TERAHERTZOVÉ ZAŘÍZENÍ TPS SPEKTRA 3000

Zařízení TPS Spectra 3000 je THz pulzní spektrometr využívající THz oblast elektromagnetického spektra. Poskytuje jedinečnou příležitost k výzkumům v široké škále významných látek vyskytujících se v biologických, chemických a fyzikálních vědách. Umožňuje generovat THz záření v rozsahu od 60 GHz do 3 THz (2cm^{-1} – 100cm^{-1}).

Všechny optické komponenty jsou montovány ručně, což zvyšuje mechanickou stabilitu zařízení, které vyžaduje jen malé každodenní seřízení. Poté, co se zařízení TPS spektra 3000 zapne, může trvat až 30 minut než se stabilizuje. Proces vypnutí trvá přibližně 45 minut z důvodu nutnosti vychladnutí laseru. Stejně množství času je třeba, k tomu aby se laser opětovně zahřál před dalším použitím.

2.1 THz spektroskopie

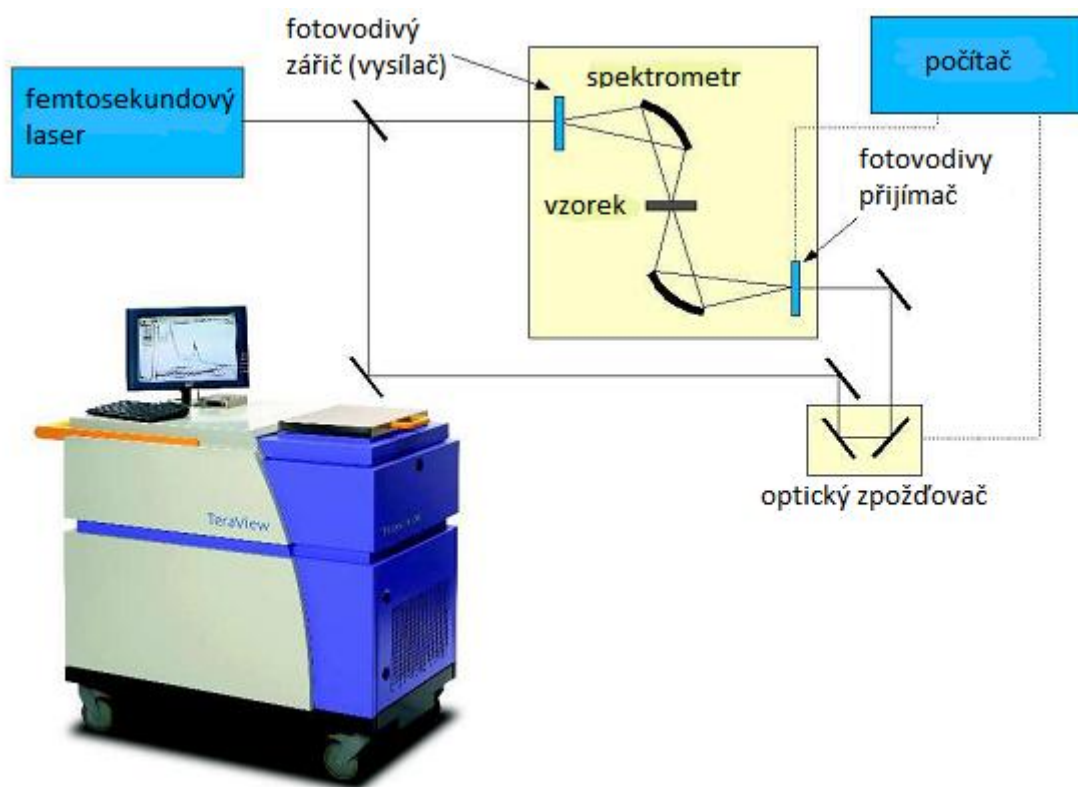


Obrázek 43 Instalace přenosového modulu do komory vzorku. [Terahertz equipment, 2013]

Pro zaznamenání spektroskopického měření si můžeme vybrat ze dvou režimů:

- **Rychlým skenováním** je skenováno optické zpoždění vytvořené rychle se pohybujícími zrcadly.
- **Krokový skenovací mód** využívá pro generování časové prodlevy krokového motoru, který otáčí koutovými zrcadly.

V **rychlém skenovacím režimu**, jsou spektra získaná v poměru 30 za sekundu se spektrálním rozlišením 32 GHz ($1,2 \text{ cm}^{-1}$). Vyšší rychlost sběru dat (až 100 Hz) je možná, ale výsledný poměr signál-šum je v konečném spektru nižší. U **krokového skenování** závisí měření času na požadovaném rozlišení a integračním čase k dosažení požadovaného poměru signálu k šumu. Nejvyšší spektrální rozlišení je 7,5 GHz ($0,25 \text{ cm}^{-1}$). Bez ohledu na to, jaké je spektrální rozlišení, je nutné využít veškerého záření od zdroje na rozdíl od infračervené FT, kde zobrazované pole musí mít sníženou světelnou činnost systému k dosažení vysokého rozlišení, což způsobuje ztrátu signálu. Jedinou výhodou má TPS výhodu nad tradičními FT spektrometry.

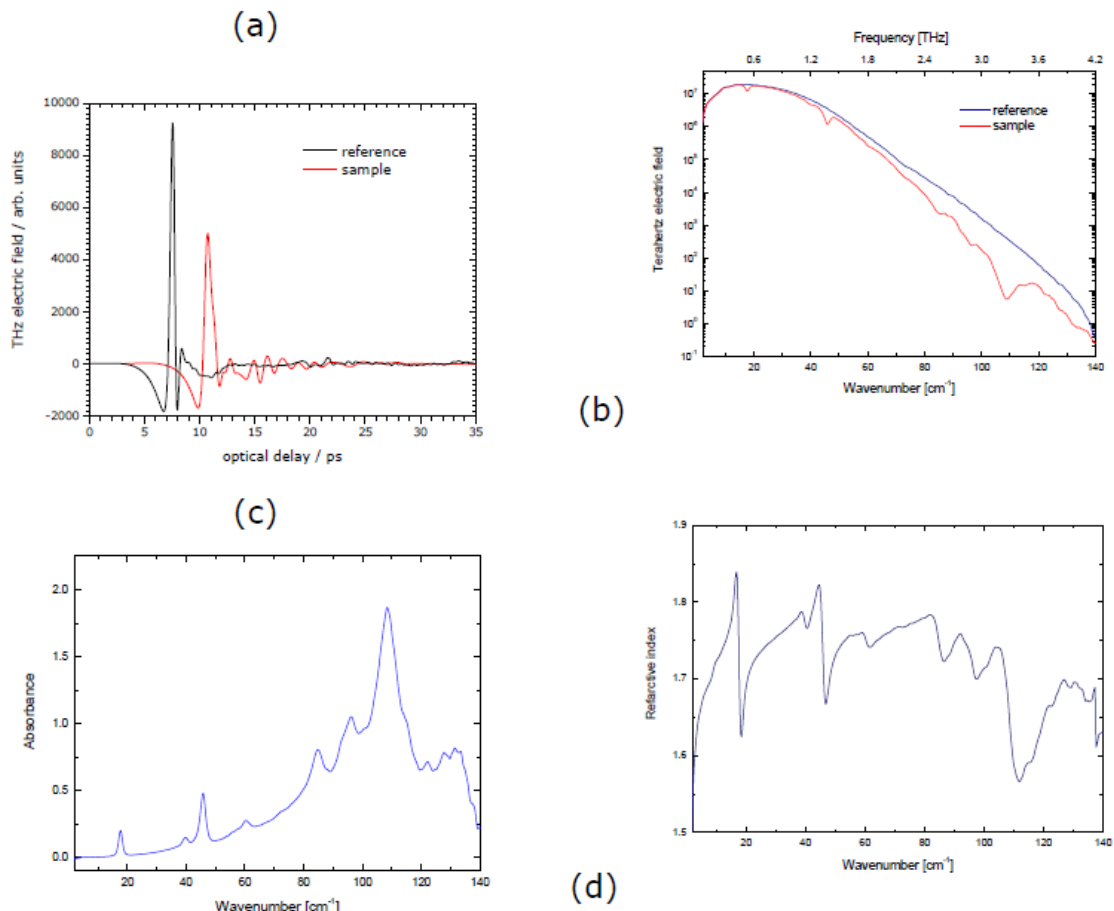


Obrázek 44 Fotografie a schématický diagram TPS spectra 3000. [Terahertz equipment, 2013]

Spektrální data jsou získána z TPS spektra 3000 v jedné konfiguraci paprsku přístroje. Proto se nejprve získává absorpční spektrum jako nástroj THz odezvy vlny (černá stopa na obrázku 45a). Terahertzové průběhy signálů mají záporné hodnoty, jelikož je

měřeno THz elektrické pole namísto intenzity signálu jako v tradiční daleko-infračervené spektroskopii. Použitím rychlé Fourierovy transformace (FFT) k tomuto průběhu terahertzového elektrického pole se vytvoří frekvenční charakteristika (obrázek 45b). Pokud je vzorek umístěn do prostoru, jsou zjevné dva rozdíly reakcí vyskytující se v THz elektrickém poli (obrázek 45a). Velikost signálu je snížena díky THz absorpci vzorku a pozice vrcholu je posunuta vzhledem k indexu lomu materiálu. [Terahertz equipment, 2013]

Tradiční absorpční spektrum se získá vydělením vzorkovacího kmitočtu reakcí frekvenční odezvy přístroje (obrázek 45 c). Je možné získat také frekvenčně závislý index lomu (obrázek 45 d). [Terahertz equipment, 2013]



Obrázek 45 Data spektrální odezvy přístroje jsou zobrazena na obrázku (a). Zobrazení frekvenční oblasti dat je na obrázku (b), absorbovaná spektra na obrázku (c) a frekvenčně závislý index lomu můžeme vidět na obrázku (d). [Terahertz equipment, 2013]

Podle elektromagnetické teorie je poměr THz elektrického pole dán jeho silou před přenosem prostřednictvím vzorku E_r , a po absolvování skrz vzorek E_s , tím je také dána informace o vyšetřovaném materiálu. Tento poměr je dán vztahem:

$$\left(\frac{E_s}{E_r}\right) = T(n) \exp\left(-\frac{\alpha d}{2} + \frac{i n \omega d}{c_0}\right) \quad (1)$$

kde d je tloušťka vzorku, ω úhlová frekvence záření, c_0 rychlost světla ve vakuu a $T(n)$ je Fresnelova ztráta odrazem při povrchu vzorku.

Měřením s poměry elektrického pole je jednoduché získat jak frekvenčně závislý index lomu n , tak absorpční koeficient α médií. V našem měření je elektrické pole vzorku dáno:

$$E_s = A_{SO} e^{j\varphi_{SO}} \quad (2)$$

A referenční elektrické pole je dáno:

$$E_r = A_{RO} e^{j\varphi_{RO}} \quad (3)$$

Pokud A_{SO} a A_{RO} jsou amplitudy elektrického pole a α_{SO} a α_{RO} jsou fáze THz impulsů. Můžeme získat absorpční koeficient:

$$\alpha d = -20 \log \left[\frac{\left(\frac{A_{SO}}{A_{RO}}\right)}{T(n)} \right] \quad (4)$$

Koeficienty A_{SO} a A_{RO} jsou získány z reálné části rychlou Fourierovou transformací. Index lomu je dán:

$$nd = \frac{c}{\omega} (\varphi_{SO} - \varphi_{RO}) \quad (5)$$

Pokud α_{SO} a α_{RO} jsou fáze vzorku a referenční THz impulsy jsou získány z imaginární části rychlé Fourierovy transformace. Pak koeficient absorpce, α vrácený programu nebere v úvahu ztráty Fresnelovou reflexí, $T(n)$. [Terahertz equipment, 2013]

2.2 ATR spektroskopie



Obrázek 46 Instalace ATR modulu. [Terahertz equipment, 2013]

Měření ATR je prováděno nanesením malého množství prášku, nebo tekutého vzorku na krystal ATR. Pro pevné látky se používá zatížení z důvodu dosažení plného kontaktu s krystalem ATR a maximalizaci absorbance. Vzorek nemusí být drcen ani kombinován s jiným materiálem jako polyetylén.

Princip této metody terahertzové ATR je znázorněn na obrázku 47 (Schematické znázornění vzorkování terahertzového ATR). THz pulzní paprsek je přiveden k zaměření na horizontální povrch ATR krystalu pomocí z-cut křemenné kondenzační čočky. Krystal ATR je zvolen z materiálu s vhodnou optickou a mechanickou vlastností. Křemíkové krystaly jsou odolné vůči chemikáliím, jsou izotropní, a mají nízký rozptyl a přenosové ztráty s THz indexem lomu 3,42. Germanium, s THz indexem lomu 4, bude dalším vhodným ATR materiálem. Křemíkové ATR krystaly jsou řezány pod úhlem buď 35°, nebo 45°. P-polarizovaný THz paprsek vytváří úhly 0° a 10° k povrchu normálního vstupního obrazu příslušného krystalu. Paprsek je lámán z centrálního úhlu θ , který se rovná buď 45°, nebo 38° na horizontálním vzorkovacím rozhraní s vlnově závislou změnou až do $\pm 5^\circ$. THz paprsek se odráží na rozhraní vzorku. Pokud je vzorek přítomen, prochází vlna do materiálu vzorku na průchozí hloubku, která je závislá na vlnočetě, indexu lomu vzorku a ATR krystalu, úhlu dopadu svazku, a polarizaci. Hloubka průniku je definována jako hloubka, při které intenzita elektromagnetického záření pronikajícího do materiálu

nebo předmětu spadá do $1/e$ původní hodnoty na povrchu. Hloubka je účinně dána $1/\alpha$, kde α je koeficient absorpce nebo molární absorpce materiálu. To souvisí s **Beer-Lambert** pravidlem, kde síla elektromagnetické vlny uvnitř materiálu je $E^2(z) = E_0^2 e^{-\alpha z}$ (Kde E_0 je síla elektrického pole záření dopadajícího na povrch a z je hloubka průniku do materiálu). Efektivní síla elektrického pole vedená materiálem je závislá na polarizaci a je dána:

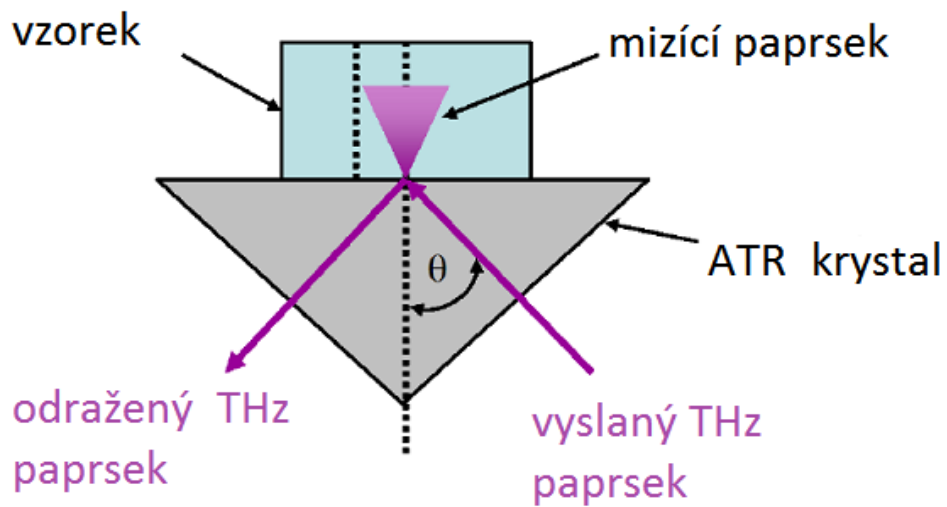
$$d_{e\perp} = \left[n_1^2 n_2 \cos \Theta / (n_1^2 - n_2^2) \right] \lambda / \left[\pi \sqrt{n_1^2 \sin^2 \Theta - n_2^2} \right] \quad (6)$$

$$d_e = \left[n_1^2 n_2 \cos \Theta / (n_1^2 - n_2^2) \right] \left[(2n_1^2 \sin^2 \Theta - n_2^2) / ((n_1^2 + n_2^2) \sin^2 \Theta - n_2^2) \right] \lambda / \left[\pi \sqrt{n_1^2 \sin^2 \Theta - n_2^2} \right] \quad (7)$$

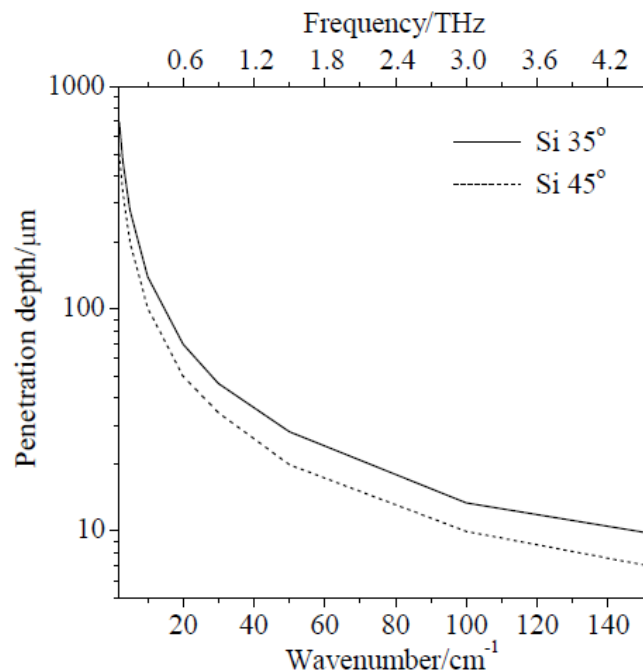
kde n_1 je index lomu vzduchu, n_2 je index lomu média podle šetření, λ je vlnová délka a Θ je úhel svazku dopadajících světelných paprsků na povrch krystalu ATR. Paralelní P-polarizovaný paprsek má hloubku přibližně dvakrát vyšší než u kolmo s-polarizovaného záření. Pro THz oblast je vypočtena průniková hloubka s paralelní P-polarizací, která je vykreslena na obrázku 47, větší než v oblasti střední infračervené. Vzhledem k tomu, že velikost vlny je závislá na rozdílné hloubce průniku ATR signálu, je vyžadována úprava průběhu na přibližně správný absorpční vztah.

$$A(\tilde{\nu}) = ATR_{signal}(\tilde{\nu}) / \tilde{\nu}_c \quad (8)$$

Kde $\tilde{\nu}_c$ je středem vlnočtu pro normalizaci absorbance. Pro optimalizaci absorpce vzorku s vysokou a nízkou koncentrací komponent ATR modulů, může být použit materiál s různým úhlem krystalu. [Terahertz equipment, 2013]



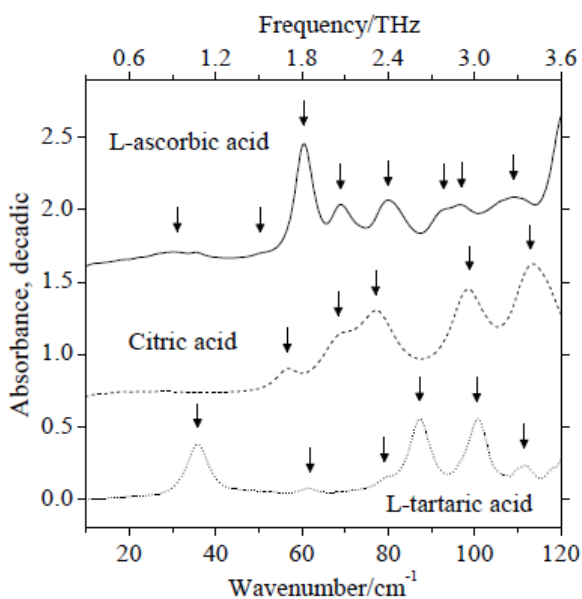
Obrázek 47 Schematické znázornění vzorkování THz ATR. [Terahertz equipment, 2013]



Obrázek 48 Vypočítaná velikost vlny závislé variace THz hloubky do vzorku s indexem lomu 1.3, pro křemíkové 35° a 45° krystaly s paralelní P-polarizací.

[Terahertz equipment, 2013]

ATR spektra můžeme vidět na obrázku (Obrázek 49), kdy bylo využito k měření frekvence od 10 cm^{-1} - 100 cm^{-1} ($0,3 \text{ THz}$ až $3,0 \text{ THz}$) při rozlišení $1,2 \text{ cm}^{-1}$ ($0,04 \text{ THz}$) za použití THz pulzního spektrometru s 35° a 45° křemíkem ATR modulu. Při každém rychlém skenování průměrně 1800 skenů za minutu použil Blackman-Harris apodizaci³. Vždy byl přitlačen 1mg vzorku každé z práškových látek pomocí ploché kovadliny na ATR krystal. Všechny tekutiny byly měřeny bez komprese. Měření byla provedena při pokojové teplotě (23° C). [Terahertz equipment, 2013]



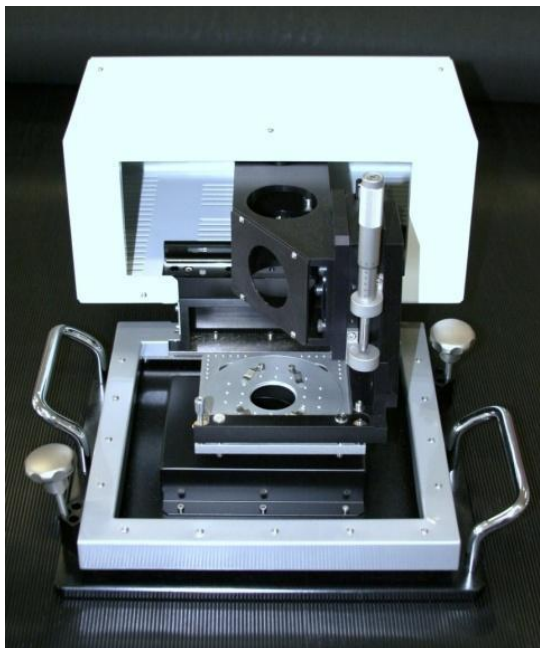
Obrázek 49 Příklad THz ATR spekter cukerných alkoholů. Šipky ukazují pozice THz kapilár. [Terahertz equipment, 2013]

³ **Apodizace** je prostorově proměnná změna amplitudy světla ve výstupní pupile. [BOUCHAL, 2008]

Způsoby apodizace:

- Zmenšení amplitudy na okraji výstupní pupily (zavádí se záměrně – umožňuje zmenšení degradace obrazu způsobené optickými vadami). [BOUCHAL, 2008]
- Zmenšení amplitudy ve středu výstupní pupily (vynucené konstrukcí – vede ke zvýšení vedlejších maxim v difrakčním obrazci). [BOUCHAL, 2008]

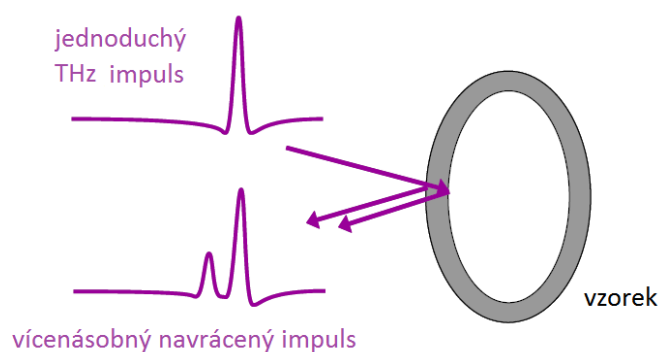
2.3 Terahertzové pulzní zobrazování



Obrázek 50 Odrazový zobrazovací modul TPI imaga 2000. [Terahertz equipment, 2013]

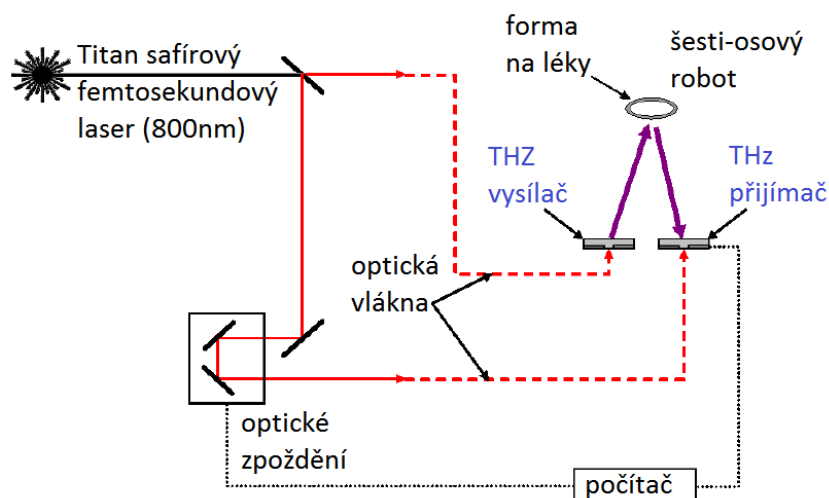
THz pulzy dopadající na objekt vytváří ozvěnu nebo se odrážejí z různých vrstev např. na vnějším povlaku povrchu, mezi krycími vrstvami a na rozhraní povlaku jádra tablety (Obrázek 51).

Terahertzové pulzní zobrazování (terahertz pulsed imaging TPI) využívá převážně informace získané odrazy terahertzového pulzu z různých hloubek způsobené změnou indexu lomu ve vzorku matice. Doba zpoždění těchto úvah je pak použita pro výpočet 3D strukturálního obrazu vzorku. Hloubka průniku koherentního THz impulsu do objektu závisí na transparentnosti materiálu záření v tomto kmitočtovém rozsahu a síle THz pulsu. Typická hloubka THz průniku do tabletového vzorku je mezi 1 až 3 mm. [Terahertz equipment, 2013]



Obrázek 51 Schéma znázorňující princip THz pulzního zobrazování. [Terahertz equipment, 2013]

Odrazy nebo ozvěny vznikají vždy, když je buď chemická, nebo strukturální změna v tabletě, což vede ke změně indexu lomu anebo absorpčního koeficientu materiálu v THz oblasti. Poměr signál-k-šumu spojený s technikou umožňuje malé změny v indexu lomu, které by měli být detekovány a zobrazeny.



Obrázek 52 Schéma komponentů TPI imaga 2000. [Terahertz equipment, 2013]

Součásti TPI imaga 2000 jsou znázorněny na obrázku (Obrázek 52). Paprsek ultrarychlého femtosekundového titan-safírového laseru je rozdělen do dvou cest a vpuštěn do samostatných optických vláken, která spojují základní TPI systém a samostatnou skenovací tabletovou jednotku. Po vystoupení z optických vláken ve skenovací tabletové jednotce jsou využity k osvětlení THz vysílače a přijímače. Vysílač a přijímač jsou obsaženy v

kompaktní kazetě jednotky s objektivem na zaměření laserového paprsku na mezery ve fotovodivém vysílači a přijímači. Zpoždovací linka je zavedena do snímače paprsku pro rozlišení optického zpoždění mezi příchozím THz pulzem a snímaným laserovým pulzem v přijímači. Modulované zkreslení je aplikováno přes vysílač a přijímací výstupní proud se vztahuje k vysílací modulaci pro generování časově řízených výstupních signálů. Obě zpožděné polohy a zesílený signál přijímače jsou pak digitalizovány a interpolovány pro získání THz elektrického pole v závislosti na optickém zpoždění v diskretních časových intervalech.

2.4 Příprava vzorku pro měření

2.4.1 Požadavky na velikost pevného vzorku

Studia na nízkofrekvenčním konci THz spektra (pod 500 GHz) ukazují, že je důležitá velikost vzorku, zejména průměr komprimovaných disků. Výsledky je možné doložit na jednoduchém příkladu, kdy difrakční-limit vzdušné velikosti disku, kde 84% energie spočívá v průměru definovaném vzorcem $2.44f \lambda/d$, kde f je ohnisková vzdálenost zrcadla, λ je vlnová délka záření, a d je průměr optického paprsku zaměřeného na vzorek. Vzorek by měl být buď větší než difrakční omezené zaostření v místě nebo uložen v držáku vzorku, aby se zabránilo možnosti úniku THz záření kolem okraje vzorku a tím vzniku chybných měření spektrální absorbance. [Terahertz equipment, 2013]

2.4.2 Příprava pevných vzorků

Se zařízením TPS spektra 3000 je dodáván držák vzorků o rozměrech 2x3 palce pro uchycení tablet nebo lisovaných disků o průměru 13 mm. Pro přípravu diskových lisovaných tablet o průměru 13mm z čisté suché směsi se doporučuje použití polyethylenu jako pevného ředidla.

Následující kroky jsou doporučeny pro přípravu vzorků:

1. Přečtěte si materiálové bezpečnostní záznamové listy (MSDS).
2. Proveďte posouzení bezpečnosti.
3. Zajistěte, aby byla velikost částic látky menší než 80 μm .

4. Vytvořte směs 20% hmotnosti vzorku a 80% hmotnosti polyethylenu. Obvykle použito 400 mg materiálu.
5. Připravte tablety o průměru 13mm, obvykle komprimováno tlakem do 2 tun. Tloušťka tablet by měla být asi 4 mm.
6. Změřte spektrum v TPI spectra 3000.
7. Pro ověření průzkumu spektra vytvořte tři různé vzorky procentuelních směsí.

2.4.3 Měření propustnosti kapalin

Pro získání extinkčního koeficientu kapaliny je třeba nejprve změřit referenční spektrum. Referenční může být prázdná buňka, nebo vzorek s jinou známou optickou délkou. Frekvenčně závislá absorbance (dekadická) lze vypočítat z Beer-Lambertova vztahu (rovnice 9 a 10).

$$A(\nu) = -\log_{10}(I_s(\nu)/I_0(\nu)) = \varepsilon(\nu)cl \quad (9)$$

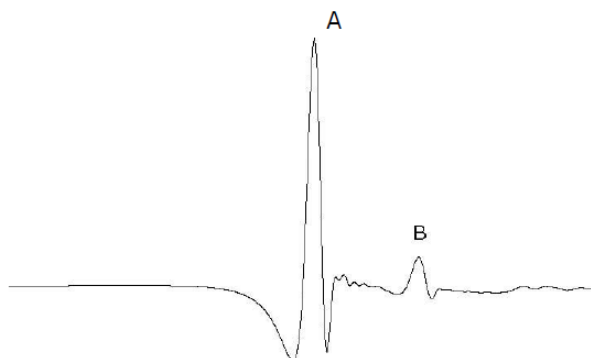
kde A je absorbance, I_0 jsou intenzity vzorku a referenční paprsky, ε je koeficient extinkce, c je koncentrace vzorku, l je ukázka délky cesty, a ν je frekvence.

$$\Delta A(\nu) = -\log_{10}(I_2(\nu)/I_1(\nu)) = \varepsilon(\nu)c(I_2 - I_1) \quad (10)$$

kde I_1 a I_2 jsou intenzity paprsků přes vzorek dvou různých délek drah, L1 a L2.

Délku cesty do vzorku lze získat jedním ze tří způsobů:

- (1) Je možné měřit přímo s mikrometrem, s typickou přesností $\pm 10 \mu\text{m}$.
- (2) Lze ji vypočítat pomocí okrajové metody, která vyžaduje FTIR spektrometr.
- (3) Lze odvodit z oddělení mezi hlavním vrcholem a prvním Fresnelovým reflexním vrcholem vyslaného impulsu přes prázdné buňky (Obrázek 54). Délku cesty vzorkem lze získat pouze odečtením polohy dvou peaků z optického zpoždění osy, která je v mm. Tato metoda může být s přesností na $\pm 1 \mu\text{m}$. Dobrá přesnost je nutná zejména pro tenké rozměry menší než 200 μm , které se používají pro měření vysoce absorbujících kapalin. [Terahertz equipment, 2013]



Obrázek 53 Postup pro stanovení délky optické dráhy pomocí Fresnelovy reflexe vrcholu (A) a první odražené peaky (B). [Terahertz equipment, 2013]

3 MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ VYBRANÝCH VZORKŮ POLYMERŮ

K měření byly vybrány jako vzorky polymery např. polypropylen (PP), polystyren (PS) a polykarbonát (PK). Dané vzorky jsem upravil na rozměry tak, aby pasovaly do úchopů spektrometru TPS Spectra 3000 fy Teraview v laboratoři FAI UTB. U použitých vzorků jsem změřil nejprve tloušťky materiálů pomocí mikrometru v deseti individuálně vybraných bodech a následně jsem naměřené hodnoty zprůměroval. Průměrnou hodnotu tloušťky materiálu v μm jsem využil pro zadání do zařízení TPS Spectra 3000. Pro výběr vhodného polymeru pro konstrukci cely jsem hodnotil vlastnosti daného materiálu v oblasti spektra od 0,3 do 2,7 THz, jelikož hodnoty nižší, nebo vyšší bývají ovlivněny šumem.

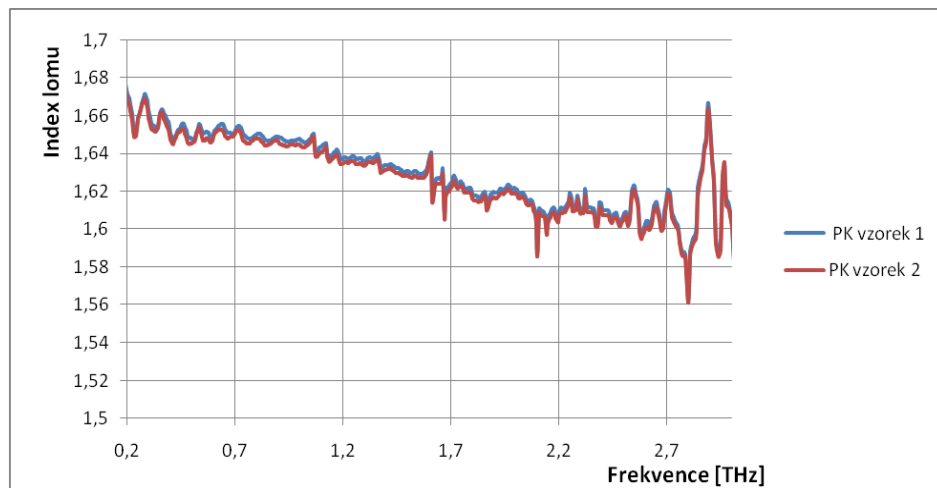
3.1 Vzorky polymerů

Jelikož pro vytvoření měřicí cely jsou nutné dva protikusy, tak jsem vždy měření tloušťky materiálu provedl u obou vzorků daného polymeru. Po zadání průměrných hodnot tloušťek polymerních materiálů do zařízení TPS Spektra 3000, bylo u všech vzorků provedeno měření indexů lomu. Měření indexů lomu vzorků polypropylenu jsem prováděl pro vytipování nejvhodnějšího typu polymeru k vytvoření měřicí cely. Pro zmenšení chyby měření jsem pro každý vzorek provedl pět měření (z nichž každé mělo 1370 skenů) a následně je zprůměroval. Vzorky polymerů byly zpracovány z běžně používaných produktů. Vzorek polypropylenu byl vyříznut z misky pod květináč, vzorek polystyrenu z nádoby na kuchyňské sypké hmoty a vzorek polykarbonátu z ochranného krytu pracovní přilby.

3.1.1 Polykarbonát (PK)

	Jednotka	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr
Vzorek 1	[mm]	1.009	1.011	1.012	1.012	1.013	1.012	1.012	1.012	1.011	1.013	1.0333
Vzorek 2	[mm]	1.015	1.021	1.021	1.017	1.017	1.02	1.019	1.019	1.02	1.019	1.0189

Tabulka 2 Tloušťky vzorků polykarbonátu.



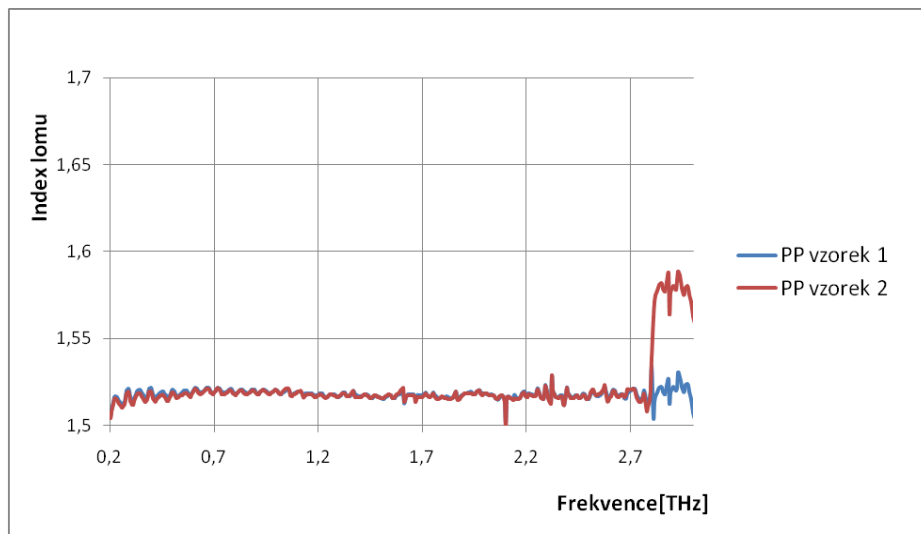
Graf 1 Indexy lomu polykarbonátu.

Z grafu (Graf 1) je patrné, že index lomu polykarbonátu není stejnorodý v žádné oblasti THz spektra od 0,5 do 2,5 THz. A tak tento materiál není vhodný pro vytvoření měřicí cely k měření spekter látek.

3.1.2 Polypropylen (PP)

	Jednotka	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr
Vzorek 1	[mm]	1.771	1.773	1.781	1.785	1.779	1.768	1.778	1.788	1.784	1.776	1.7783
Vzorek 2	[mm]	1.787	1.785	1.781	1.783	1.777	1.785	1.782	1.788	1.793	1.793	1.7854

Tabulka 3 Tloušťky vzorků polypropylenu.



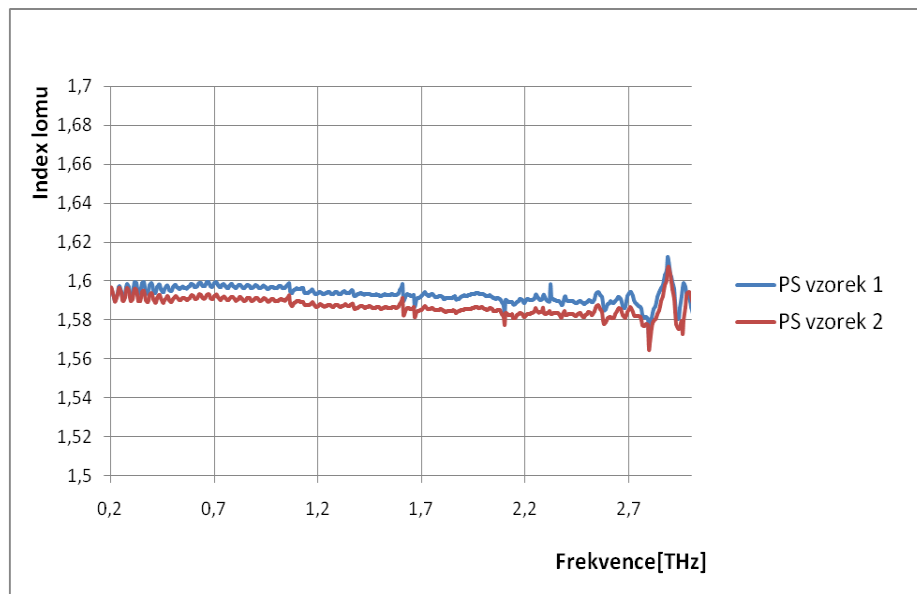
Graf 2 Indexy lomu polypropylenu.

U vzorků polypropylenu jsem naměřil v oblasti od 0,3 do 2,7 THz, přibližně stejný index lomu, až na malá rozvlnění které se vztahují k nedokonalému očištění prostoru měřicí komory od atmosferických par. Takže vzorek polypropylenu by byl vhodný pro vytvoření měřící cely, ale já jsem jej nezvolil z důvodu špatných vlastností při slepování.

3.1.3 Polystyren (PS)

	Jednotka	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr
Vzorek 1	[mm]	2.342	2.371	2.397	2.372	2.395	2.303	2.336	2.381	2.391	2.382	2.367
Vzorek 2	[mm]	2.391	2.393	2.394	2.397	2.362	2.376	2.382	2.384	2.377	2.332	2.3788

Tabulka 4 Tloušťky vzorků polystyrenu.



Graf 3 Indexy lomu polystyrenu.

Vzorky polystyrenu měly při měření v oblasti od 0,3 do 2,7 obdobné indexy lomu jako u polypropylenu, opět krom menšího rozkmitání způsobeného vodními parami. Takže vzorek polystyrenu je také vhodný pro měření THz spekter u látek stejně tak jako polypropylen. Pro lepší vlastnosti při lepení jsem pro konstrukci cely zvolil polystyren.

4 MĚŘÍCÍ CELY

K lepení měřících cel ze vzorku polystyrenů jsem zvolil dvousložkové epoxidové lepidlo. K lepení malé cely byla použita oboustranná venkovní páska. U měřících cel jsem provedl změření referenčních hodnot pro ověření vhodnosti cel k měření spekter zkoumaných vzorků v THz oblasti. K odstranění spektrálních vlivů spojených s atmosférickou vlhkostí jsem využil při měření suchého dusíku.

4.1 Malá cely

Malou celu jsem zkonstruoval pro měření spekter kapalných látek. Její tvar jsem navrhl tak, aby bylo možno celu jednoduše plnit a zároveň aby měl kudy vycházet nepotřebný vzduch z komory pro měření. Pro jednoduché plnění je nutné použít injekční stříkačku. Tloušťka mezery malé cely je průměrně 1,8197 mm.

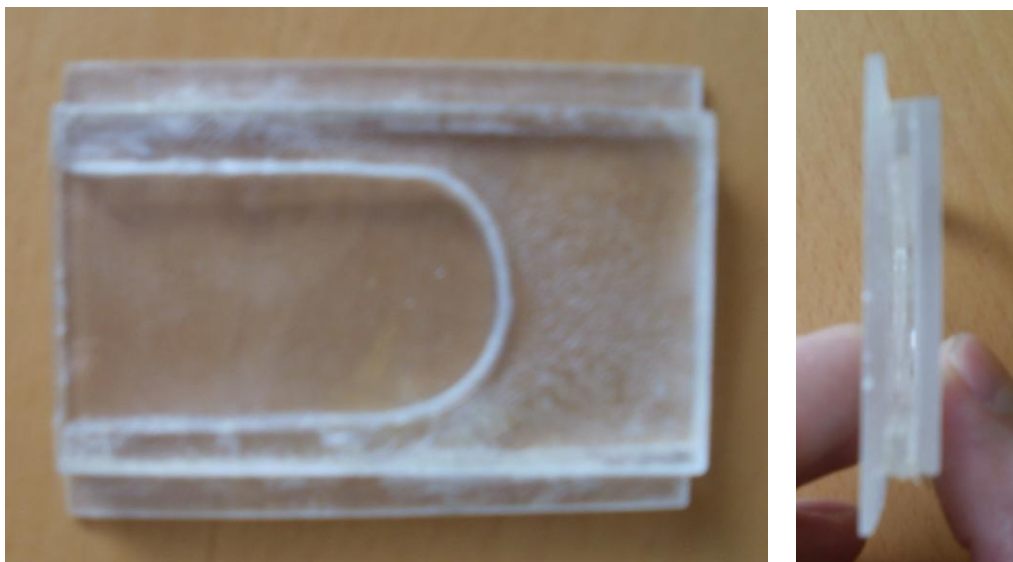


Obrázek 54 Fotografie malé cely.

4.2 Střední cely

Střední celu jsem vytvořil pro sypké látky s jemnější hrubostí, popřípadě je možnost celu využít pro látky hustší konzistence, se kterými by byla špatná manipulace při plnění a vyprazdňování malé cely nebo pro mastné roztoky, kdy bude nutné celu dobře odmastit.

Prostor pro plnění je navržen do tvaru písmene U tak, aby bylo možno látku z cely jednoduše vyndat, popřípadě aby byla možnost si pomoci jakýmkoliv tenkým předmětem. Tloušťka mezery střední cely je 2,9261 mm.



Obrázek 55 Fotografie střední cely.

4.3 Velká cely

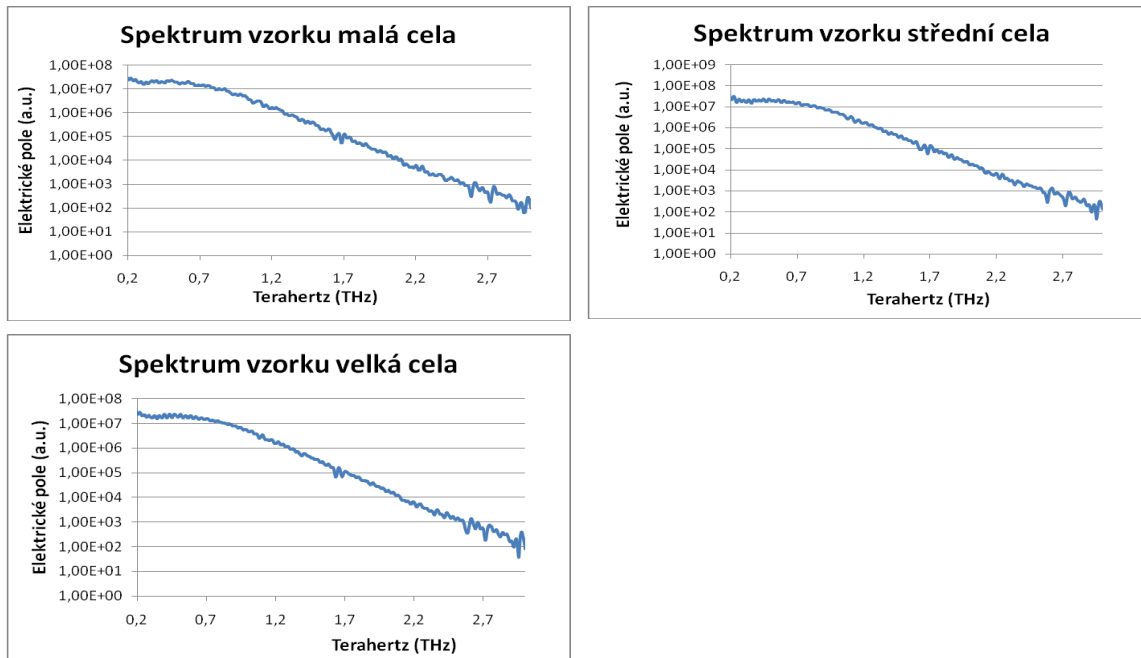
Velkou celu jsem zkonstruoval pro látky s větší hrubostí. Prostor pro plnění je opět navržen do tvaru písmene U. Tloušťka mezery této cely je 4,3025 mm.



Obrázek 56 Fotografie velké cely.

4.4 Měření vlastností měřících cel

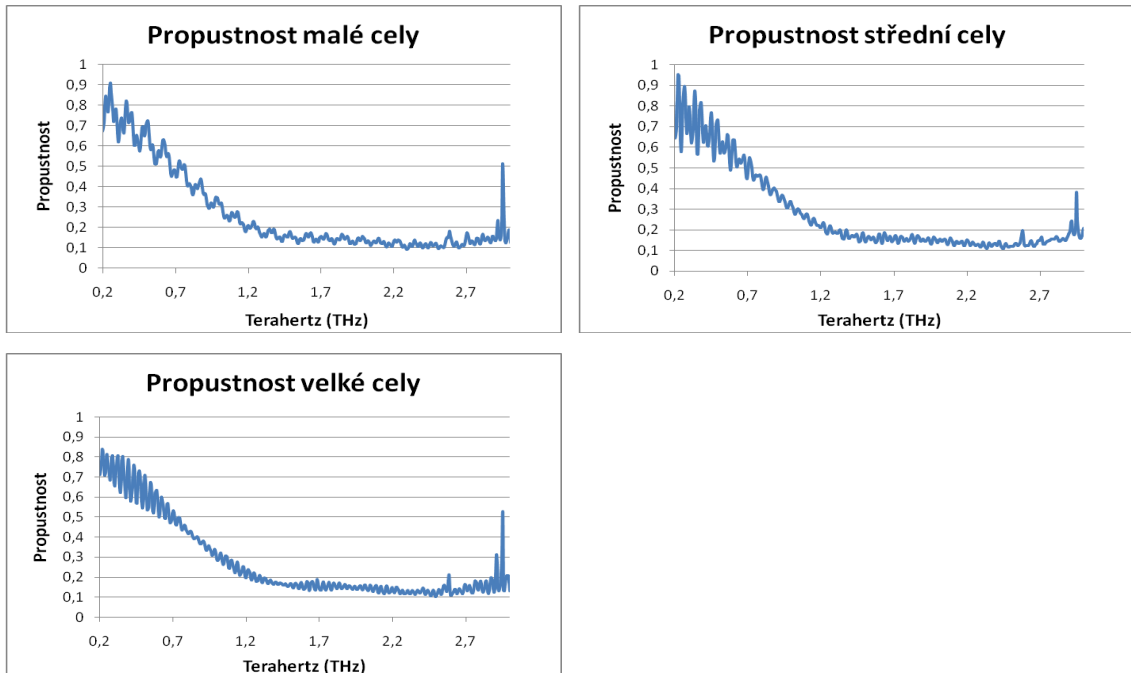
4.4.1 Spektrum měřících cel



Graf 4 Spektrum měřících cel.

U všech cel jde vidět, že propouští veškeré frekvence obsažené v THz oblasti od 0,2 do 3 THz, což je jednou z podmínek pro vhodnost měřící cely k měření neznámých vzorků.

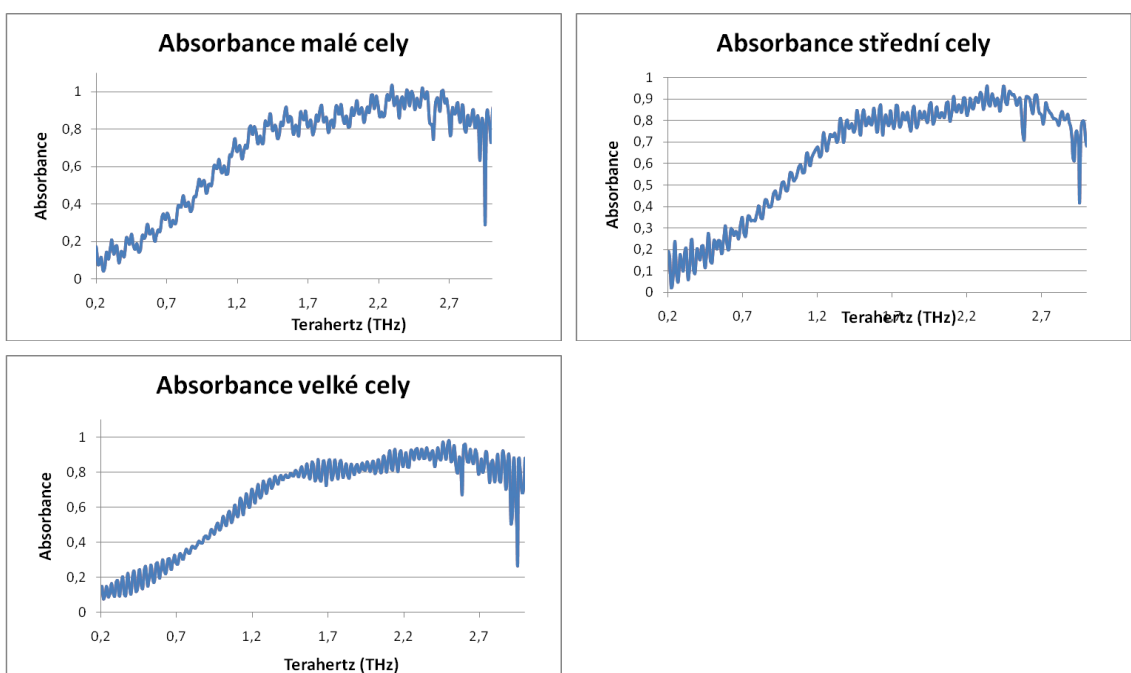
4.4.2 Propustnost měřících cel



Graf 5 Propustnost měřících cel.

Propustnost všech cel byla taktéž v pořádku, kdy se v průběžích objevovalo jen malé rozkmitání. Na konci průběhu se objevil pik v okolí frekvence 2,9 THz, který hodnotíme jako šumový.

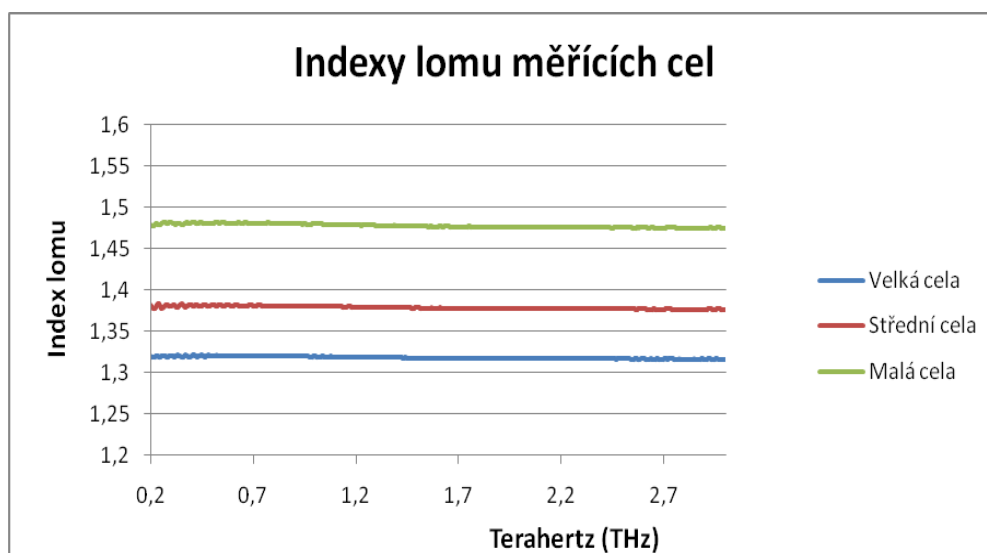
4.4.3 Absorbance měřících cel



Graf 6 Absorbance měřících cel.

Absorbanci všech cel hodnotíme, jako dostačující pro měření vzorků. V průběhu se neobjevil žádný pík, který by značil, větší absorbování některé z frekvencí oproti jiným.

4.4.4 Index lomu měřících cel



Graf 7 Indexy lomu měřících cel.

Z indexů lomů všech tří cel je patrné, že všechny cely jsou vhodné k měření indexů lomů neznámých vzorků v oblasti THz spektra, jelikož index lomu je ve všech frekvencích od 0,2 do 3 THz až na malá zvlnění stejnorodý a nevyskytuje se zde žádný pík ani velké zvlnění.

4.5 Zhodnocení využitelnosti měřících cel

Pro vytvořené cely jsem provedl měření referenčních hodnot, jednak proto, abych porovnal referenční hodnotu s hodnotou vzorku, ale taky proto, abych určil, zda jsou měřící cely vhodné k měření neznámých vzorků. Pro měření neznámých vzorků je nutné, aby cely propouštěla veškeré frekvence THz záření od 0,2 do 3 THz. S tímto nebyl problém ani u jedné z cel. Dalším požadavkem je, aby cely byla propustná a měla co nejmenší absorpenci a nakonec, aby měla stejnorodý index lomu. Všechny tyto parametry se mi podařilo dodržet. Z výše uvedeného vyplývá, že jsou cely vhodné pro měření vzorků v rozsahu od 0,3 do 2,7 THz.

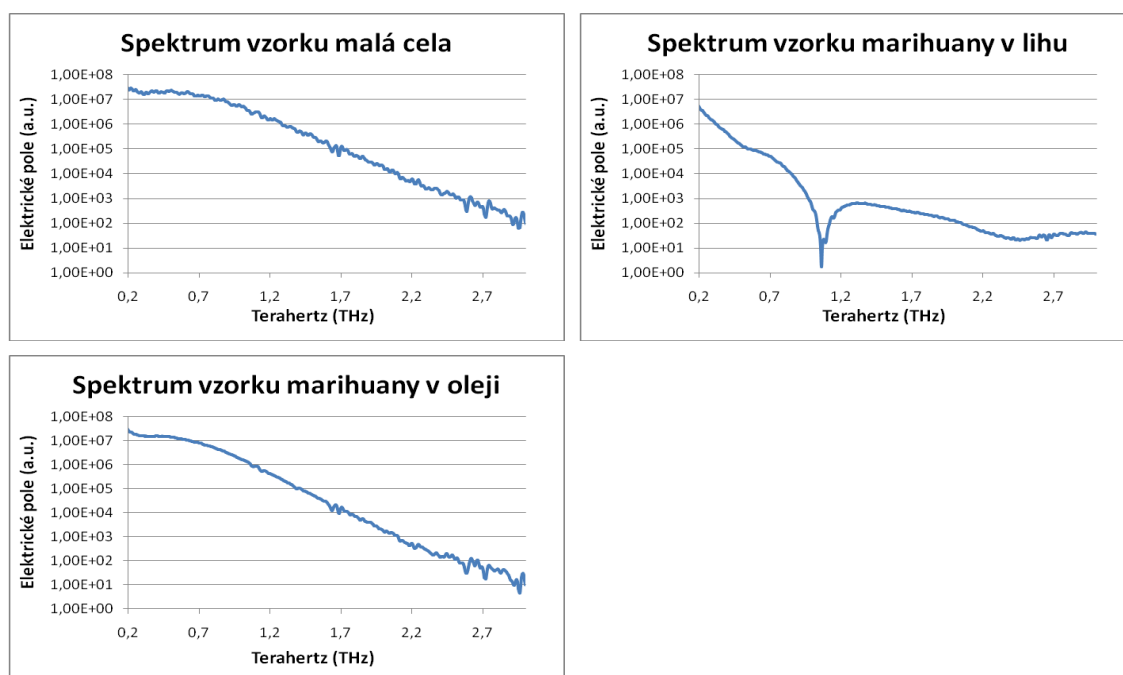
5 MĚŘENÍ A ANALÝZA SPEKTER VYBRANÝCH LÁTEK

5.1 Příprava vzorků

Z důvodu špatné dostupnosti jakýchkoliv drog či výbušnin, které se nejčastěji vyskytují v oblasti bezpečnostních technologií, byla jako vzorek pro měření zvolena marihuana, která bývá využívána jako droga, nebo jako léčebný prvek (s obsahem látky tetrahydrocannabinol). Marihuanu jsem vyluhoval v technickém lihu a zahřátém olivovém oleji. Šišky marihuany byly utrženy z rostliny marihuany odrůdy „bílá vdova“, pěstované v domácích podmínkách.

5.2 Měření spekter THz záření v malé cele

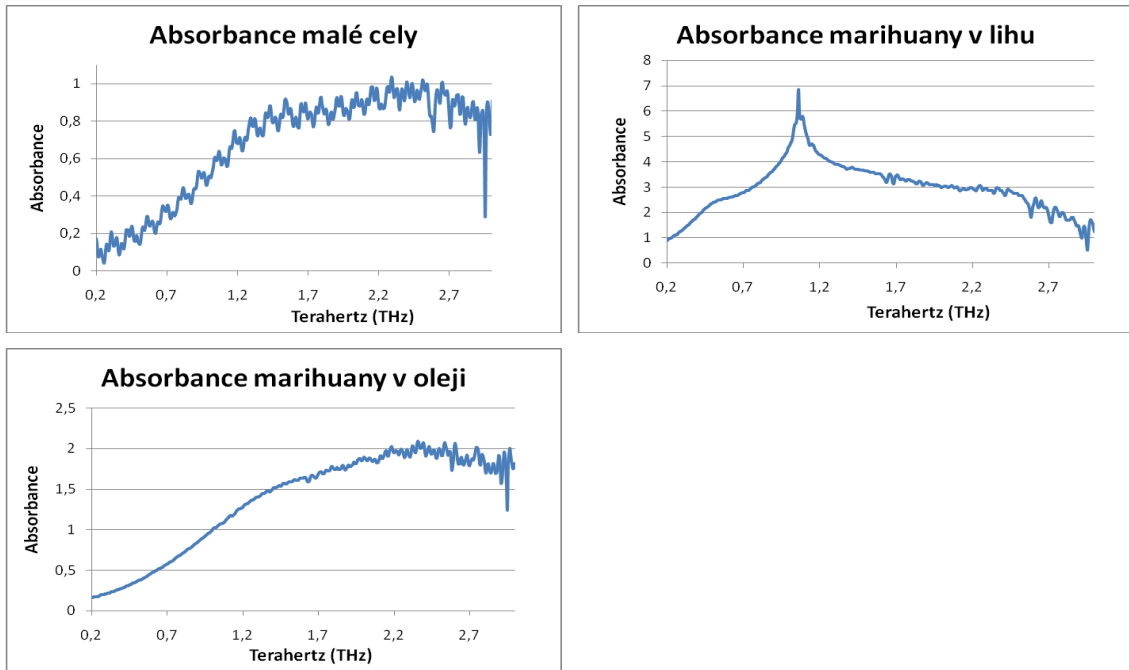
5.2.1 Spektrum propustné skrz vzorek



Graf 8 Zobrazení hodnot spekter vyluhované marihuany v porovnání s referenční hodnotou u malé cely.

V grafu spektra vzorku marihuany v lihu můžeme vidět pík v oblasti spektra kolem 1 THz, který značí nepropustnost dané frekvenční oblasti. U marihuany vyluhované v olivovém oleji zůstalo spektrum téměř nezměněno oproti referenční hodnotě, jen se zde mírně odfiltroval signál šum.

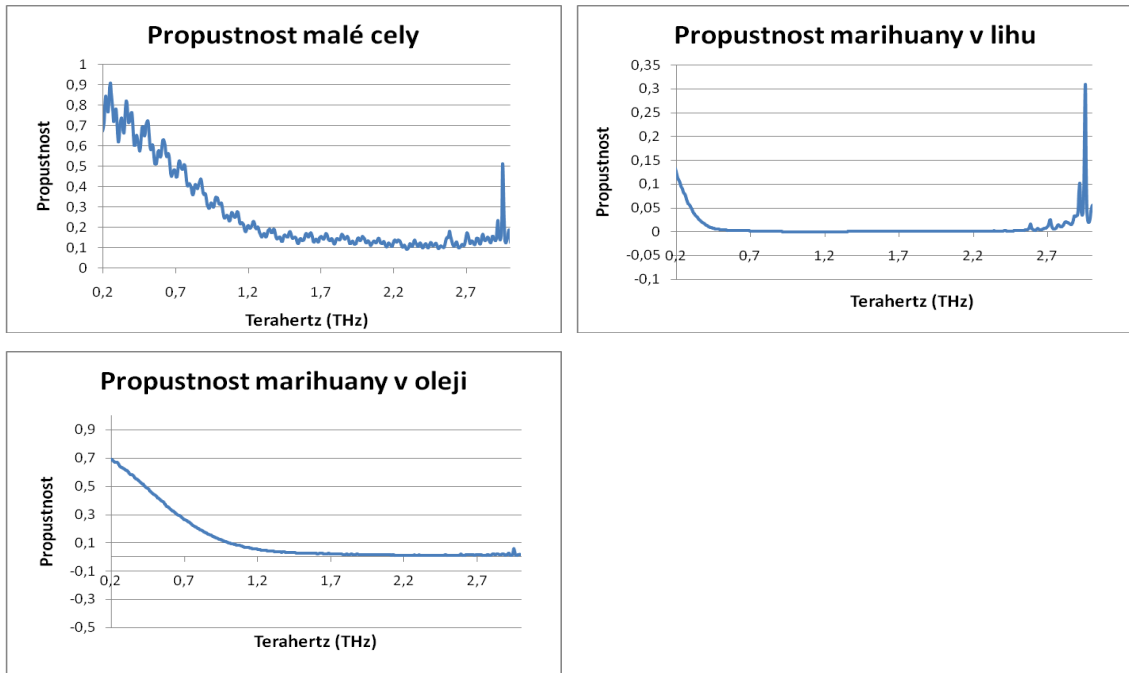
5.2.2 Porovnání absorbance



Graf 9 Zobrazení hodnot absorbance vyluhované marihuany v porovnání s referenční hodnotou u malé cely.

Graf absorbance marihuany vyluhované v lihu a olivovém oleji nám ukazuje, že se neobjevil žádný charakteristický pík pro marihuanu a celé spektrum je ovlivněno vysokou absorbancí a malou propustností.

5.2.3 Porovnání propustnosti

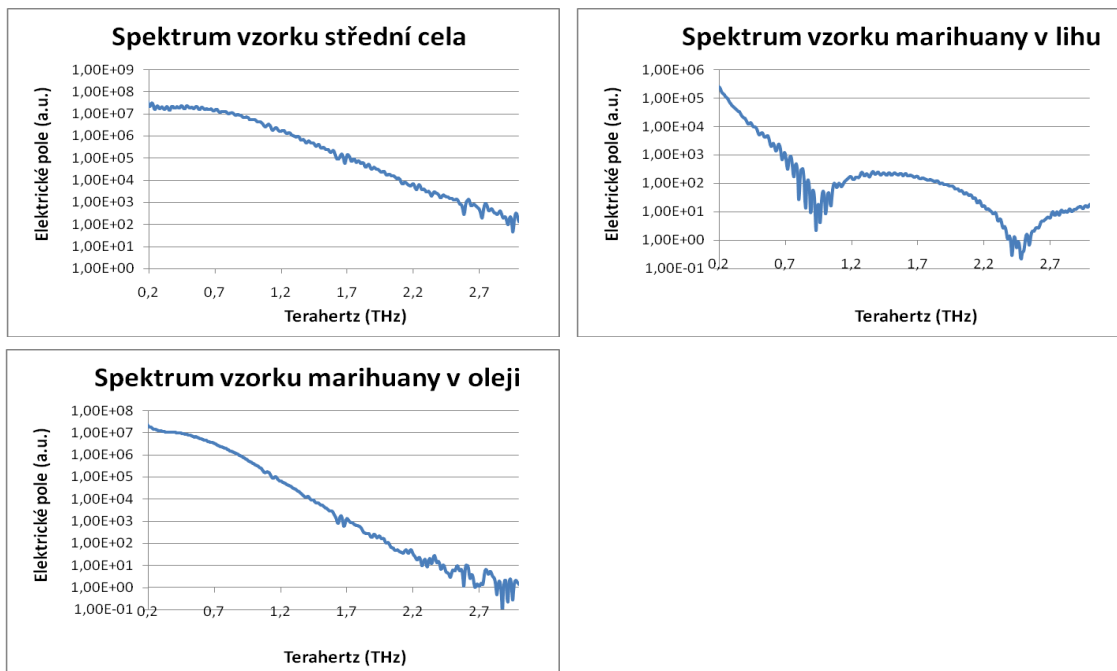


Graf 10 Zobrazení hodnot propustnosti vyluhované marihuany v porovnání s referenční hodnotou u malé cely.

U marihuany vyluhované v lihu je snížena propustnost na nulu již od hodnoty 0,45 THz. Od této hodnoty můžeme posuzovat jen jeho index lomu. U marihuany vyluhované v oleji je propustnost lepší, ale pro hodnocení můžeme využít pouze oblasti od 0,2 do 1,3 THz.

5.3 Měření spekter THz záření ve střední cele

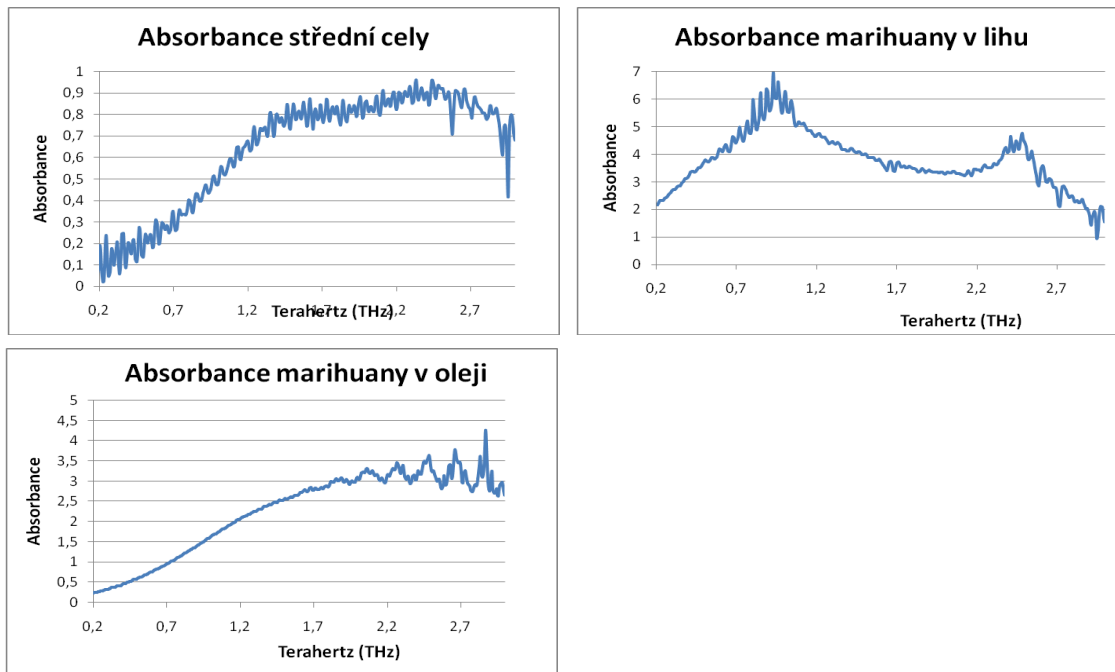
5.3.1 Spektrum propustné skrz vzorek



Graf 11 Zobrazení hodnot spekter vyluhované marihuany v porovnání s referenční hodnotou u střední cely.

Na vzorku marihuany vyluhované v lihu můžeme vidět opět nepropustnost frekvencí v oblasti 1 THz, ale nově se objevila nepropustnost v oblasti od 2,35 do 2,55 THz, což bude nejspíše nepropustnost spektra charakteristická pro lih, jelikož podobná nepropustnost se u marihuany vyluhované v olivovém oleji nevyskytla. U vzorku marihuany vyluhované v olivovém oleji můžeme vidět jen větší zvlnění za hodnotou 2 THz, které nelze charakterizovat jako typické pro marihuanu.

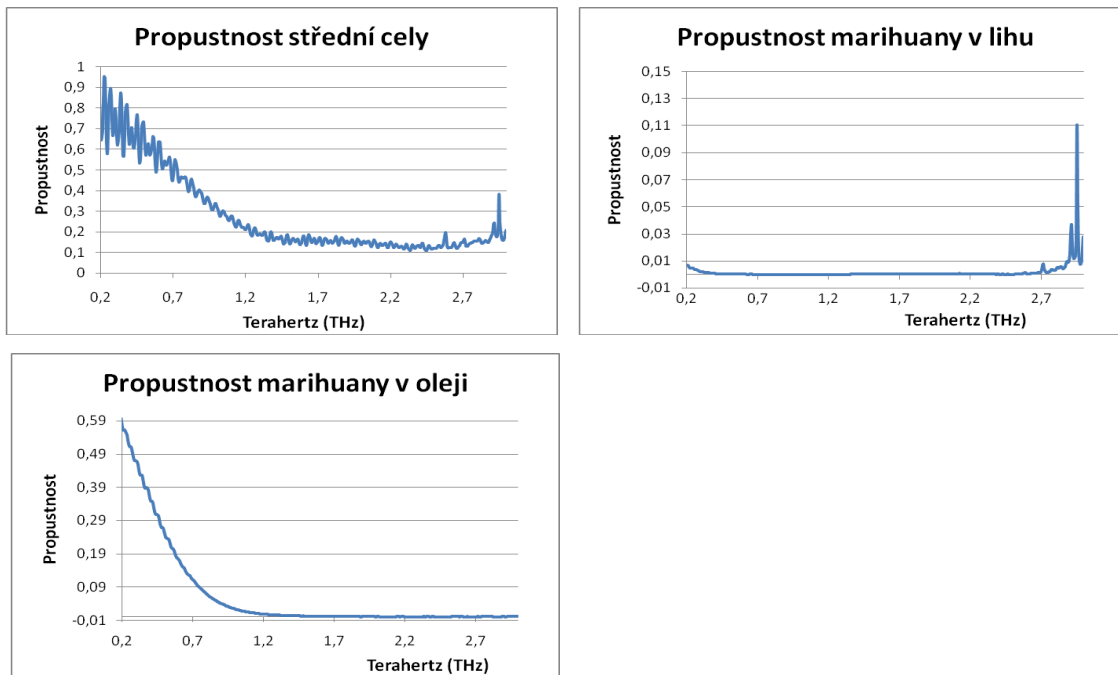
5.3.2 Porovnání absorbance



Graf 12 Zobrazení hodnot absorbance vyluhované marihuany v porovnání s referenční hodnotou u střední cely.

Z grafu absorbance marihuany v lihu můžeme vidět, že se zvýšila i strmost počáteční absorbance, kdy již při 0,2 THz se zvýšila hodnota absorbance z hodnoty 1 na 2,1 oproti malé cely. U absorbance marihuany v olivovém oleji by se dala zvlňění za oblastí frekvence 1,7 považovat za charakteristická pro marihuanu, ale je potřeba provést ověření v porovnání např. se vzorkem marihuany vyluhované ve stolním oleji. Jinak můžeme vidět že zpočátku spektra od 0,2 do 1,7 THz je odfiltrován signál šum, který se nacházel u referenční hodnoty.

5.3.3 Porovnání propustnosti



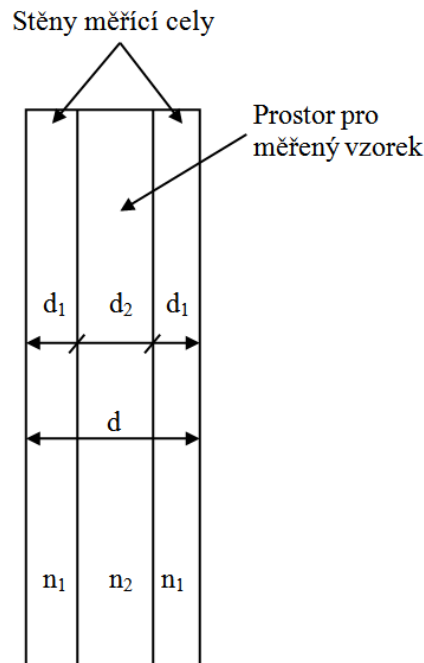
Graf 13 Zobrazení hodnot propustnosti vyluhované marihuany v porovnání s referenční hodnotou u střední cely.

Propustnost vzorku marihuany vyluhované v lihu se u střední cely zvětšila, kdy má vzorek nulovou propustnost již od 0,3 THz. U vzorku marihuany vyluhované v olivovém oleji se taktéž snížila propustnost, kdy vzorek vykazuje nulovou propustnost již od hodnoty 1,1 THz. Z důvodu zvyšování nepropustnosti s rostoucí šířkou vzorku jsem měření u tlusté cely vypustil.

5.4 Výpočet indexu lomu vzorku

Pro zobrazení indexu lomu specifického pro měřený vzorek v měřící cele je nutné přepočítat hodnoty, aby ve výsledné hodnotě nebylo ovlivnění indexem lomu měřící cely.

5.4.1 Výpočet indexu lomu vzorku měřeného v měřící cele



Obrázek 57 Popis měřící cely, kde d je šířka média a n je index lomu.

Index lomu vzorku měřeného v měřící cele v našem případě index lomu marihuany vyluhované v olivovém oleji vypočteme ze vztahu:

$$n_{\text{cela}_s\text{ marihuanou}_v\text{ oleji}} d = n_1 d_1 + n_2 d_2 + n_1 d_1 \quad (11)$$

Kde $n_{\text{cela}_s\text{ marihuanou}_v\text{ oleji}}$ je naměřený index lomu pro marihuanu vyluhovanou v olivovém oleji vloženou do měřící cely, d je celková tloušťka cely, n_1 je index lomu stěny měřící cely v našem případě polystyrenu, d_1 je tloušťka stěny měřící cely, n_2 je index lomu měřeného vzorku v tomto případě marihuany vyluhované v olivovém oleji a d_2 je velikost mezery měřící cely. Pro zjištění n_2 , které značí index lomu vzorku marihuany v olivovém oleji, musíme upravit vzorec do následujícího tvaru:

$$n_2 = \frac{n_{\text{cela}_s\text{ marihuanou}_v\text{ oleji}} d - 2n_1 d_1}{d_2} \quad (12)$$

Z upraveného vzorce neznáme jen hodnoty n_1 a d_1 , které si vypočteme stejným vzorcem, který použijeme pro prázdnou celu.

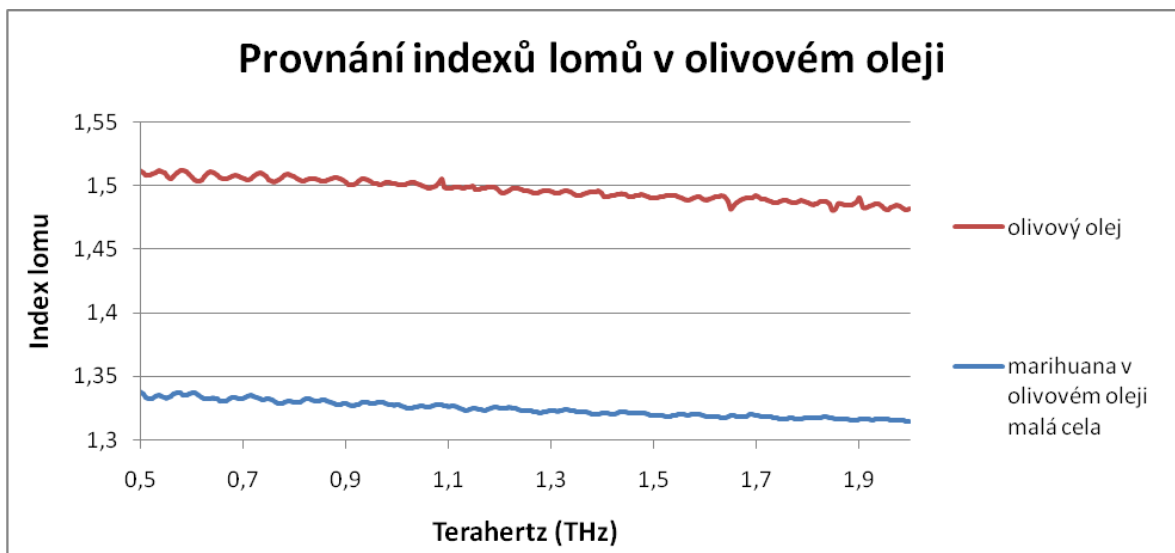
$$n_{prázdné_cely} d = n_1 d_1 + 1 d_2 + n_1 d_1 \quad (13)$$

$$2n_1 d_1 = n_{prázdné_cely} d - d_2$$

Ve vzorci jsem nahradil neznámou n_2 hodnotou 1 odpovídající pro vzduch, který se nacházel v měřeném prostoru. Tento upravený vzorec můžeme dosadit do předešlého vzorce, kdy získáme následující tvar

$$n_{2_ (marihuana_v_oleji)} = \frac{n_{cela_s_marihuanou_v_oleji} d - n_{prázdné_cely} d + d_2}{d_2} \quad (14)$$

Z daného vzorce již lze po dosazení hodnot vypočítat čistý index lomu pro měřený vzorek v tomto případě pro marihuanu vyluhovanou v olivovém oleji.



Obrázek 58 Porovnání naměřených indexů lomů u olivového oleje.

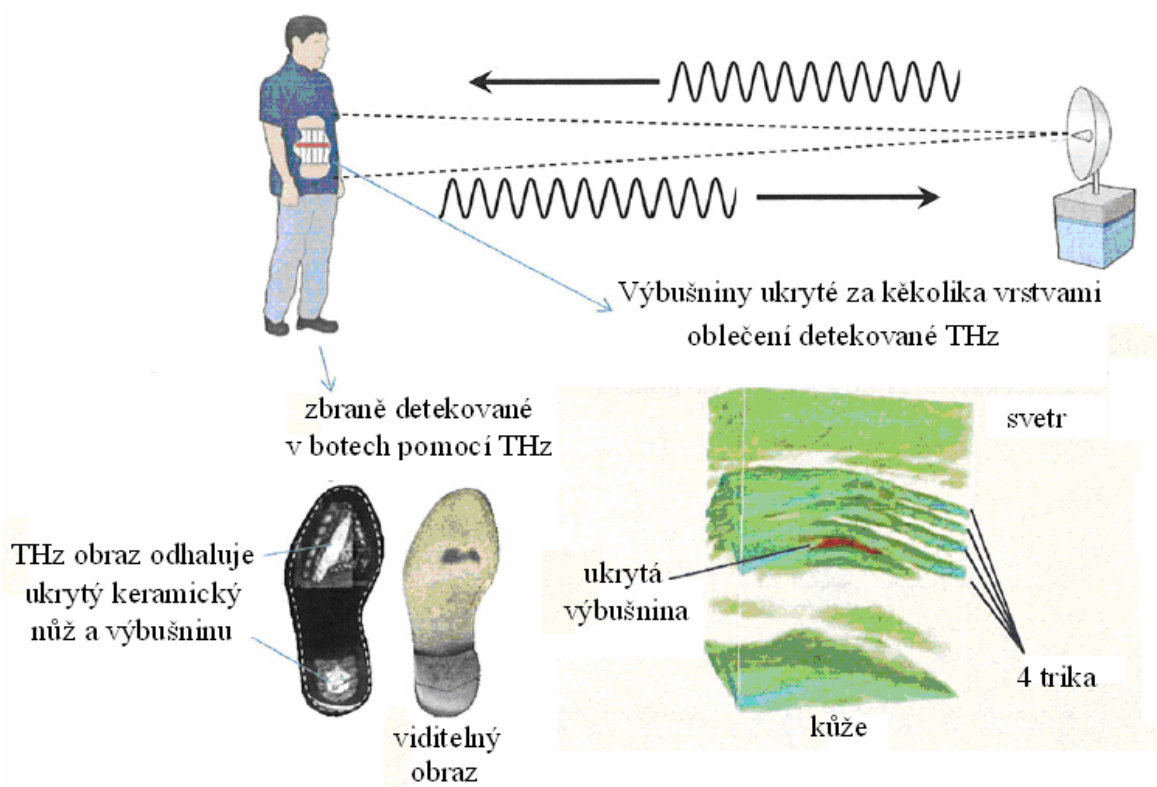
Hodnota indexu lomu olivového oleje byla použita z dřívějších měření v cele šířky 1,892mm. Z grafu lze vyčíst, že index lomu marihuany vyluhované v olivovém oleji umístěné v malé cele o šířce mezery 1,8197mm je snížen oproti hodnotě indexu lomu u čistého olivového oleje o hodnotu 0,17. Marihuana také z průběhu indexu lomu u malé cely odfiltrovala rysy charakteristického zvlnění pro olivový olej.

6 ANALÝZA MOŽNOSTÍ UPLATNĚNÍ THZ SPEKTROSKOPIE

THz spektroskopii lze využít v mnoha oblastech a oborech, zejména v oblasti bezpečnosti osob, zdravotnictví, doručovatelství, výzkumu apod.

Na základě událostí a možných hrozeb v oblasti veřejné bezpečnosti posledních let byl zvýšen nátlak na vyvíjení metod pro odhalování výbušných a jiných nebezpečných materiálů, kdy značné nebezpečí představují především pro obyvatele poválečných států nášlapné miny.

Terahertzové technologie mohou bezpečně, neinvazivně a rychle zobrazovat nebezpečné prvky skrz různé typy oblečení a další maskování popřípadě skrz shluk materiálů. THz mají velkou výhodu oproti jiným technologiím, jsou citlivé na přítomnost výbušnin, což je výrazné zlepšení oproti standardním "metal-only" detektorům využívaným v současné době.

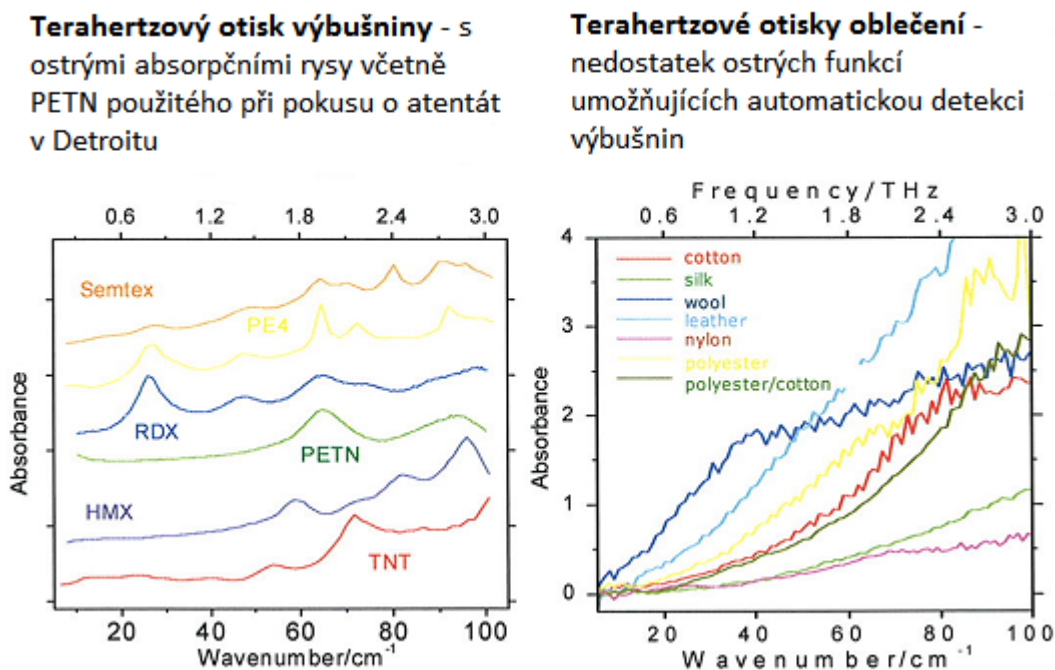


Obrázek 59 Princip detekování zbraní, výbušnin a drog od firmy Teraview. [Teraview, 2013]

Tato detekce probíhá automatizovaným způsobem, kdy detekce a identifikace skrytých výbušných materiálů probíhá bez zásahu obsluhy. THz spektrum je absorbováno

výbušnými látkami v určitých frekvencích, tím je dán THz otisk odlišný od otisků oblečení, nebo jiných inertních materiálů, který může být použit při identifikaci výbušniny.

Vzhledem k tomu, že je oblečení průhledné v THz frekvencích, může THz záření projít několika vrstvami. [Teraview, 2013]



Obrázek 60 Příklady THz otisků výbušnin a oblečení. [Teraview, 2013]

THz paprsek na rozdíl od rentgenového, nevyužívá ionizující záření a proto je bezpečný. Možnost používat software, který rozpozná THz obraz, odstraňuje problémy se zobrazováním anatomie celého lidského těla, které bylo kritizováno u milimetrových vln a rentgenové technologie. [Teraview, 2013]

V THz bezpečnostních aplikacích je nejdůležitější využití spektroskopie a zobrazování. Nejlepší využití pro systém vzdáleného odhalování a rozpoznávání drog, zbraní a výbušnin ukrytých v zavazadlech, pod oblečením nebo v obuvi najde v prostorách s vysokým pohybem osob jako je například stanice metra, vlaková nádraží apod. Dále se uplatní pro detekci nebezpečných předmětů, drog nebo nebezpečných látek v systému prohlídek osob a zavazadel na letištích. THz záření není ionizující, a tak je bezpečné pro osobní prohlídku kdy je osoba vystavována THz záření.

THz systémy lze také použít pro jeho specifickou vlastnost, kdy záření prochází skrz papír, pro detekci nebezpečných chemických látek či biologických zbraní, drog a výbušnin v krabicích, obálcích atp.

Poslední oblastí, kde je možné využít THz spektroskopii, je detekce škodlivých plynů nebo nebezpečných plynů jako je např. kyanovodík, amoniak.

Budoucí vývoj v THz oblasti se bude ubírat především k rozvoji v oblasti vzdálené detekce, kdy pro větší vzdálenosti bude nutné počítat s vlastnostmi okolních rušících vlivů jako je např. prach, kouř nebo atmosférická vlhkost. Další možnou oblastí, kam by mohly směřovat THz technologie, by mohlo být zdravotnictví, kde by THz technologie mohly doplňovat funkci rentgenu a byly by zdraví neškodné.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce byla vytvořena především pro vytvoření návrhu konstrukce cely k měření kapalných látek v zařízení TPS spektra 3000. Oblast THz technologií se řadí k mladým rozvíjejícím se vědním disciplínám, o čemž svědčí také omezený zdroj publikací k danému oboru. Převážná část informací byla čerpána z cizojazyčné literatury, internetových zdrojů a manuálů od výrobce.

Teoretická část práce se zabývá popisem stávajícího stavu techniky v THz oblasti, kdy je tato část rozdělena do třech podoborů, věnujícím se zdrojům, detektorům a optice využívané u THz zařízení.

Praktická část se zabývá popisem zařízení TPS spektra 3000 a možnými metodami měření. Dále jsou popsány funkce a využití rozšiřujících modulů k tomuto zařízení. Poté jsem se věnoval výběru a přípravě vhodných vzorků polymerů pro vytvoření měřicí cely. U těchto vzorků jsem následně provedl měření v oblasti THz spektra, podle kterého jsem následně určoval vhodnost ke konstrukci měřicí cely. Z daných vzorků polymerů mi vyšel nejlépe polystyren, který má zároveň dobré vlastnosti pro slepování. Následující část práce se zabývá návrhem měřících cel pro kapalně a sypké látky a jejich následnou realizací. U těchto cel jsem změřil referenční hodnoty, abych mohl posoudit vhodnost pro měření neznámých vzorků v THz oblasti. Podařilo se mi docílit vhodných parametrů u všech cel. Tyto cely byly ponechány v laboratoři pro další výzkumná měření a lze je využít pro měření kapalných a sypkých vzorků v THz oblasti.

Referenční hodnoty prázdných cel, které byly naměřeny, jsem porovnal s hodnotami naměřenými u vzorků marihuany vyluhované v lihu a marihuany vyluhované v olivovém oleji. Měření marihuany jsem pro vysokou absorpci vzorků měřil pouze v malé a střední cele. Výsledkem práce je zjištění, že pro detekci marihuany nebyly nalezeny žádné výrazné charakteristické peaky nebo větší zvlnění – tento výsledek mohl být však ovlivněn skutečností, že u testované marihuany nebylo ověřeno množství koncentrace THC. Při testování bylo zjištěno, že hodnota indexu lomu byla rozdílná u olivového oleje a u marihuany vyluhované v olivovém oleji. Po provedených pokusech jsem rovněž došel k závěru, že využití lihu k vyluhování látek pro účely THz spektroskopie není vhodný z důvodu vysoké absorpce a malé propustnosti.

Na závěr jsem provedl zhodnocení možného budoucího vývoje a uplatnění THz spektroskopie. V dalším období se dá očekávat, že se THz spektroskopie bude rozvíjet především ve zdravotnictví, kdy bude doplňovat rentgenové záření.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

The thesis has been drawn up especially for the creation the design of the cell for measurement of liquids at TPS spectra 3000. Field of the THz technology is one of the young developing scientific disciplines about which indicative the limited supply of publications for this field. Most of the information was drawn from the literature in foreign languages, internet resources and manuals from the producers.

The theoretical part of the thesis describes the current state of the technology in the THz field, where this part is divided into three sub-sections devoted to the sources, detectors and optics used for THz devices.

The practical part deals with description of the device of TPS spectra 3000 and possible methods of measurement. Then function and utilization of extension modules to this device are described. Then I focused on the selection and preparation of suitable polymer samples to create the measure cell. Afterwards I performed at these samples measurements in the field of THz spectrum, than I determine the suitability of the design of the measuring cell. From the polymer samples the best is a polystyrene to create the measure cell, which is also good for stick something together. The following part of the thesis deals with design of measuring cells for liquids and solids and their subsequent implementation. For these cells, I measured reference values to consider suitability for the measurement of unknown samples in the THz field. I managed to obtain suitable parameters for all cells. These cells were left in the laboratory for further research measurements and can be used for measuring the liquid and powdery samples in the THz field. I compare the reference values of empty cells, which were measured, with values measured on samples of marijuana extracted in alcohol and marijuana extracted in olive oil. I made measurement of the marijuana for its highly absorbing only in small and medium-sized cell. The result is that the significant characteristic peaks or greater vibrations for the detection of marijuana are not found – however this result could be influenced by the fact that in the test has not been verified amount of THC concentration in marijuana. During testing, it was found that the value of the refractive index was different in the olive oil and the marijuana extracted in olive oil. After the performed experiments I also concluded that the utilization of alcohol to extract substances for the THz spectroscopy is not suitable because of the high absorbance and low permeability.

Finally I made the evaluation of potential for the future development and application of THz spectroscopy. In the future, we can expect that the THz spectroscopy will develop primarily in a health care when it will replenish the X-rays.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BOUCHAL, Zdeněk. Optické zobrazování: Učební pomůcka pro studenty oboru Optika a optoelektronika. *Univerzita Palackého v Olomouci: Katedra optiky* [online]. 2008 [cit. 2013-04-15]. Dostupné z: <http://optics.upol.cz/cs/vyuka-studijni-materialy>
- [2] DEXHEIMER, Susan L. *Terahertz Spectroscopy: Principles and Applications*. Boca Raton: CRC Press, 2008. ISBN 978-0-8493-7525-5.
- [3] FEKETE, Ladislav. *Ultrafast carrier dynamics in semiconductors studied by Time-resolved terahertz spectroscopy*. Prague, 2008. 78 s. Dostupné z: <http://department.fzu.cz/lts/pdf/t-lf.pdf>. Dizertační práce. Charles University in Prague. Vedoucí práce RNDr. Petr Kužel, Dr.
- [4] FÜLÖP, J. A., L. PÁLFALVI, G. ALMÁSI a J. HEBLING. Design of high-energy terahertz sources based on optical rectification. *Optics Info Base* [online]. 2010, roč. 18, č. 12, s. 8 [cit. 2013-02-27]. Dostupné z: http://www.opticsinfobase.org/view_article.cfm?gotourl=http%3A%2F%2Fwww%2Eopticsinfobase%2Eorg%2FdirectPDFAccess%2F9F4DD1E8-B345-A6EB-1C23AC7D3CAA0C62_199762%2Foe-18-12-12311%2Epdf%3Fda%3D1%26id%3D199762%26seq%3D0%26mobile%3Dno&org=
- [5] GU, Ping Study of terahertz radiation from InAs and InSb. *School of Electrical & Electronic Engineering* [online]. 2002, roč. 91, č. 9, s. 5 [cit. 2013-02-18]. Dostupné z: http://www.eleceng.adelaide.edu.au/groups/thz/documents/gu_2002_jap.pdf
- [6] GAVENDA, Martin. *Využití terahertzových frekvencí v bezpečnostních aplikacích*. Zlín, 2011. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati. Vedoucí práce doc.RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.
- [7] HOFFMANN, Matthias C., KA-LO, Janos HEBLING a Keith A NELSON. Efficient terahertz generation by optical rectification at 1035 nm. *Optics Info Base* [online]. 2007, roč. 15, č. 18, s. 8 [cit. 2013-03-05]. Dostupné z: http://www.opticsinfobase.org/view_article.cfm?gotourl=http%3A%2F%2Fwww%2Eopticsinfobase%2Eorg%2FdirectPDFAccess%2FF1E68117-C3FE-DE54-5434D1812D8DB083_141090%2Foe-15-18-11706%2Epdf%3Fda%3D1%26id%3D141090%26seq%3D0%26mobile%3Dno&org=

- [8] CHUANG, Shun Lien, Stefan SCHMITT-RINK, Benjamin I. GREENE, Peter N. SAETA a Anthony F. J. LEVI. Optical rectification at semiconductor surfaces. *Physical Review Letters* [online]. 1992, roč. 68, č. 1 [cit. 2013-03-06]. DOI: 10.1103/PhysRevLett.68.102. Dostupné z: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.68.102>
- [9] KAWASE, Kodo, Manabu SATO, Tetsuo TANIUCHI a Hiromasa ITOA. Coherent tunable THz-wave generation from LiNbO3 with monolithic grating coupler. *School of Electrical & Electronic Engineering* [online]. 1996, roč. 68, č. 18, s. 3 [cit. 2013-03-13]. Dostupné z: http://www.eleceng.adelaide.edu.au/groups/thz/documents/kawase_1996_apl.pdf
- [10] Kolimace dalekohledu není strašák. *Supra: dalekohledy* [online]. 2004 [cit. 2013-04-17]. Dostupné z: <http://www.supra-dalekohledy.cz/clanky/kolimace/>
- [11] LIU, Kai, Jingzhou XU a X.-C. ZHANG. GaSe crystals for broadband terahertz wave detection. [online]. 2004, s. 13 [cit. 2013-02-29]. DOI: 10.1063.
- [12] LEE, Yun-Shik. *Principles of Terahertz Science and Technology*. Oregon: Springer, 2009. ISBN 978-0-387-09539-4.
- [13] NAHATA, Ajay, Aniruddha S. WELING a Tony F. HEINZ. A wideband coherent terahertz spectroscopy system using optical rectification and electro-optic sampling. *Tony F. Heinz* [online]. 1996, roč. 69, č. 16, s. 3 [cit. 2013-03-01]. Dostupné z: <http://heinz.ee.columbia.edu/publications/Pub71.pdf>
- [14] ROSTAMI, Ali, Hassan RASOOLI a Hamed BAGHBAN. *Terahertz Technologies: Fundamental and Applications*. Berlín: Springer, 2011. ISBN 978-3-642-15792-9.
- [15] SCHNEIDER, Arno, Marcel STILLHART a Peter GUNTER. High efficiency generation and detection of terahertz pulses using laser pulses at telecommunication wavelengths. *Optics info base* [online]. 2006, roč. 14, č. 12, s. 9 [cit. 2013-02-16]. Dostupné z: http://www.opticsinfobase.org/view_article.cfm?gotourl=http%3A%2F%2Fwww%2Eopticsinfobase%2Eorg%2FdirectPDFAccess%2FFAD6FECA-D7DA-9413-FCDB03E2516A1753_90297%2Foe-14-12-5376%2Epdf%3Fda%3D1%26id%3D90297%26seq%3D0%26mobile%3Dno&org=
- [16] STILLHART, Marcel, et al. Organic Crystals for THz Wave Applications. *Proceedings of the Symposium on Photonics Technologies for 7th Framework*

- Program* [online]. Switzerland : [s.n.], 2006 [cit. 2011-03-23]. Dostupné z: http://www.opera2015.org/deliverables/D_4_3_Wroclaw_Symposium/articles/43_Gunter.pdf.
- [17] Take A Look Inside: Terahertz Technologies. *Toptica: photonics* [online]. 2012 [cit. 2013-04-26]. Dostupné z: http://www.toptica.com/uploads/media/toptica_BR_terahertz_2012_06.pdf
- [18] Terahertz equipment: TPS Spectra 3000 – THz Pulsed Imaging and Spectroscopy. *TeraView* [online]. 2013 [cit. 2013-03-12]. Dostupné z: <http://www.teraview.com/products/terahertz-pulsed-spectra-3000/index.html>
- [19] VODOPYANOV, Konstantin. Terahertz Technologies and Applications. *MyCCNet* [online]. 2008, s. 6 [cit. 2013-02-22]. Dostupné z: https://ccnet.stanford.edu/cgi-bin/course.cgi?cc=ee392g&action=handout_view&V_section=general
- [20] ZHANG, X.-C., B.B. HU, J.T. DARROW a D.H. AUSTON. Generation of femtosecond electromagnetic pulses from semiconductor surfaces. *Deepdyve* [online]. 1990, roč. 56, č. 11, s. 3, 18.6.2009 [cit. 2013-03-13]. DOI: 10.1063/1.102601. Dostupné z: <http://www.deepdyve.com/lp/aip/generation-of-femtosecond-electromagnetic-pulses-from-semiconductor-ZF8RrZxeZO?key=aip>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

MSDS	Material Safety Data Sheets.
TPS	Terahertzová pulzní spektroskopie
THz	Terahertz
GHZ	Gigahertz
MW	Micro wave
IR	Infra red
OR	Optická rektifikace
DFG	Difference frequency generation
BWO	Backward wave oscillator
FEL	Free elektron laser
PC	Photo conductive
QCL	Quantum cascade laser
MMIC	Monolitický mikrovlonný integrovaný obvod
HH	Heavy holes
LH	Light hole
TDS	Tima domain spectroscopy
EO	Elektro optické vzorkování
LO	Lokální oscilátor
TGS	Triglycerin sulfát
DTGS	Druhotný triglycerin sulfát
FFT	Fast Fourier transformation
TPI	Terahertz pulsed inaging
PP	Polypropylen
PS	Polystyren

PK	Polykarbonát
FTIR	Fourier Transform Infrared
FT	Fourier Transform
ATR	Attenuated Total Internal Reflectance

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 THz oblast elektromagnetického spektra. [Take a look inside, 2012]	12
Obrázek 2 Princip THz pulzního generování. [Terahertz equipment, 2013].....	13
Obrázek 3 Rozdělení THz zdrojů. [LEE, 2009].....	14
Obrázek 4 Dělení THz zdrojů. [LEE, 2009].....	16
Obrázek 5 Typy THz zdrojů. [LEE, 2009]	17
Obrázek 6 Zobrazení principu optické rektifikace.....	17
Obrázek 7 Grafické vyobrazení účinnosti THz záření získaného optickou rektifikací. [GAVENDA, 2011].....	21
Obrázek 8 Graf Závislost energie THz pulzu na energii budícího pulzu laseru. [HOFFMANN et al., 2007]	22
Obrázek 9 Schéma principu vytváření DFG. [LEE, 2009]	23
Obrázek 10 Fázový synchronismus v krystalu LiNbO ₃ pro OPA. [LEE, 2009].....	24
Obrázek 11 Gunn dioda – VA charakteristika, konvertor. [LEE, 2009]	25
Obrázek 12 Triplikátor s obvodem Schottkyho diod. [LEE, 2009].....	26
Obrázek 13 Fotelektrický spínač. [LEE, 2009]	27
Obrázek 14 Nákres modelu PC antény. [GAVENDA, 2011].....	29
Obrázek 15 Schematické vyjádření principu PC antény. [LEE, 2009].....	29
Obrázek 16 Struktury elektrod PC antén. [LEE, 2009]	30
Obrázek 17 a) Fotelektrické směšování, b) Logaritmická spirálová anténa. [GAVENDA, 2011].....	32
Obrázek 18 a) PC anténní dipól, b) Graf závislosti výstupního výkonu na frekvenci pro PC anténu. [GAVENDA, 2011].....	33
Obrázek 19 PC anténa s dvojitým dipólem. [LEE, 2009].....	33
Obrázek 20 Schéma THz zdroje - urychlovač částic. [LEE, 2009]	34
Obrázek 21 Schéma konstrukce oscilátoru zpětné vlny BWO. [LEE, 2009]	35
Obrázek 22 Zobrazení principu BWO. [VODOPYANOV, 2008]	36
Obrázek 23 Princip FEL. [VODOPYANOV, 2008]	37
Obrázek 24 Blokové schéma principu FEL. [GAVENDA, 2011].....	38
Obrázek 25 Schéma principu laseru, konstrukce. [LEE, 2009].....	39
Obrázek 26 Schématické vyjádření energií populační inverse v p-typu Ge. [LEE, 2009].....	41

Obrázek 27 Konstrukce p-tyu Ge THz laseru. [LEE, 2009].....	42
Obrázek 28 Rozdíl mezi běžným a kvantovým kaskádovým laserem. [LEE, 2009].....	43
Obrázek 29 Princip kvantového kaskádového laseru. [LEE, 2009]	44
Obrázek 30 Vyobrazení metod koherentní THz detekce. [LEE, 2009]	46
Obrázek 31 Blokové schéma elektro-optického vzorkování ve volném prostoru. [GAVENDA, 2011].....	48
Obrázek 32 ZnTe <110> orientovaný krystal. [LEE, 2009]	49
Obrázek 33 PC anténní přijímač. [LEE, 2009]	50
Obrázek 34 Schéma heterodynního detektoru. [LEE, 2009]	51
Obrázek 35 Schéma bolometru. [LEE, 2009].....	54
Obrázek 36 Zapojení bolometru do Wheatsonova můstku. [LEE, 2009].....	55
Obrázek 37 Vlnovod s Winstonovými koncentrátory. [LEE, 2009].....	56
Obrázek 38 Struktura pyroelektrického detektoru. [LEE, 2009]	57
Obrázek 39 Schéma Golayova článku. [LEE, 2009]	58
Obrázek 40 a) Parabolické zrcadlo, b) čočka. [LEE, 2009].....	59
Obrázek 41 a) jednovrstvá, b) dvouvrstvá antireflexní povrchová úprava. [GAVENDA, 2011].....	60
Obrázek 42 Pásmový filtr. [LEE, 2009]	61
Obrázek 43 Instalace přenosového modulu do komory vzorku. [Terahertz equipment, 2013].....	63
Obrázek 44 Fotografie a schématický diagram TPS spectra 3000. [Terahertz equipment, 2013].....	64
Obrázek 45 Data spektrální odezvy přístroje jsou zobrazena na obrázku (a). Zobrazení frekvenční oblasti dat je na obrázku (b), absorbovaná spektra na obrázku (c) a frekvenčně závislý index lomu můžeme vidět na obrázku (d). [Terahertz equipment, 2013]	65
Obrázek 46 Instalace ATR modulu. [Terahertz equipment, 2013].....	67
Obrázek 47 Schematické znázornění vzorkování THz ATR. [Terahertz equipment, 2013].....	69
Obrázek 48 Vypočítaná velikost vlny závislé variace THz hloubky do vzorku s indexem lomu 1.3, pro křemíkové 35° a 45° krystaly s paralelní P-polarizací. [Terahertz equipment, 2013]	69

Obrázek 49 Příklad THz ATR spekter cukerných alkoholů. Šipky ukazují pozice THz kapilár. [Terahertz equipment, 2013]	70
Obrázek 50 Odrazový zobrazovací modul TPI imaga 2000. [Terahertz equipment, 2013].....	71
Obrázek 51 Schéma znázorňující princip THz pulzního zobrazování. [Terahertz equipment, 2013].....	72
Obrázek 52 Schéma komponentů TPI imaga 2000. [Terahertz equipment, 2013].....	72
Obrázek 53 Postup pro stanovení délky optické dráhy pomocí Fresnelovy reflexe vrcholu (A) a první odražené peaky (B). [Terahertz equipment, 2013]	75
Obrázek 54 Fotografie malé cely.	80
Obrázek 55 Fotografie střední cely.	81
Obrázek 56 Fotografie velké cely.	81
Obrázek 57 Popis měřicí cely, kde d je šířka média a n je index lomu.	91
Obrázek 58 Porovnání naměřených indexů lomů u olivového oleje.	92
Obrázek 59 Princip detekování zbraní, výbušnin a drog od firmy Teraview. [Teraview, 2013]	93
Obrázek 60 Příklady THz otisků výbušnin a oblečení. [Teraview, 2013]	94

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 THz frekvence získané z plynového laseru. [LEE, 2009].....	40
Tabulka 2 Tloušťky vzorků polykarbonátu.....	76
Tabulka 3 Tloušťky vzorků polypropylenu.	77
Tabulka 4 Tloušťky vzorků polystyrenu.	78

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Indexy lomu polykarbonátu.	77
Graf 2 Indexy lomu polypropylenu.	78
Graf 3 Indexy lomu polystyrenu.	79
Graf 4 Spektrum měřících cel.	82
Graf 5 Propustnost měřících cel.	83
Graf 6 Absorbance měřících cel.	83
Graf 7 Indexy lomu měřících cel.	84
Graf 8 Zobrazení hodnot spekter vyluhované marihuany v porovnání s referenční hodnotou u malé cely.	85
Graf 9 Zobrazení hodnot absorbance vyluhované marihuany v porovnání s referenční hodnotou u malé cely.	86
Graf 10 Zobrazení hodnot propustnosti vyluhované marihuany v porovnání s referenční hodnotou u malé cely.	87
Graf 11 Zobrazení hodnot spekter vyluhované marihuany v porovnání s referenční hodnotou u střední cely.	88
Graf 12 Zobrazení hodnot absorbance vyluhované marihuany v porovnání s referenční hodnotou u střední cely.	89
Graf 13 Zobrazení hodnot propustnosti vyluhované marihuany v porovnání s referenční hodnotou u střední cely.	90