

Využití terahertzových frekvencí v bezpečnostních aplikacích

Improvement of terahertz frequencies in security applications

Martin Gavenda

Diplomová práce
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin GAVENDA**
Osobní číslo: **A09359**
Studijní program: **N 3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**

Téma práce: **Využití terahertzových frekvencí v bezpečnostních aplikacích**

Zásady pro vypracování:

1. Popište stávající stav techniky v oblasti THz frekvencí spektra.
2. Zabývejte se možnými aplikacemi uvedeného frekvenčního pásma a proveďte výběr oblastí souvisejících s bezpečnostními aplikacemi.
3. Srovnejte aplikace THz vln s ostatními metodami ochrany objektů a osob.
4. Popište principy zobrazovacích systémů a spektroskopických zařízení a navrhňte možnosti výzkumu a vývoje ve vztahu k FAI UTB.
5. Pokuste se připravit vzorky k analýze v oblasti THz frekvencí a vyhodnocení vstupních experimentů.
6. Odhadněte další pokračování vývoje v dané oblasti.

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. GRISCHKOWSKY, D. ; FATTINGER, Ch. Terahertz beams. In Applied physics letters 54 Issue 6 [online]. New York : Applied Physics Letters, 1988 [cit. 2011-02-01]. Dostupné z WWW: [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=4859163].
3. FERGUSON, Bradley; ZHANG, Xi-Cheng. Materials for terahertz science and technology. Nature Materials [online]. 2002, 1, [cit. 2011-02-01]. Dostupný z WWW: [http://www.eleceng.adelaide.edu.au/thz/publications/ferguson_2002_npg.pdf].
4. Http://department.fzu.cz/lts/:Laboratory of Terahertz Spectroscopy [online]. Praha : 2010 [cit. 2011-02-01]. Dostupné z WWW: [http://department.fzu.cz/lts/].
5. VAN EXTER, Martin ; FATTINGER, Ch. ; GRISCHKOWSKY, D. High-brightness terahertz beams characterized with an ultrafast detector. In Applied physics letters 55 Issue 4 [online]. New York : Applied Physics Letters, 1989 [cit. 2011-02-01]. Dostupné z WWW: [http://apl.aip.org/resource/1/applab/v55/i4/p337_s1?isAuthorized=no].

Vedoucí diplomové práce: **doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.**

Ústav elektroniky a měření

Datum zadání diplomové práce: **25. února 2011**

Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2011**

Ve Zlíně dne 25. února 2011

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan



doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

V diplomové práci jsou v teoretické části popsány metody a technologie, které využívají záření v terahertzové oblasti elektromagnetického spektra, a jejich uplatnění v bezpečnostních aplikacích. V práci je postupně popsána oblast THz frekvencí z různých perspektiv, jimiž jsou metody vytváření, přenosu a detekce THz záření, aplikace THz technologií, popis principů THz zobrazování a spektroskopie. Zároveň je práce věnována využití THz frekvencí v bezpečnostních aplikacích, výběru aplikačních směrů souvisejících s bezpečností, srovnání bezpečnostních aplikací THz vln s aplikacemi jiných technologií. V závěru teoretické části jsou nastíněny možnosti vývoje a výzkumu ve vztahu k FAI UTB a odhad budoucího vývoje terahertzové oblasti. Praktická část obsahuje přípravu vzorků a experiment Ramanovy spektroskopie.

Klíčová slova: terahertz, THz, spektroskopie, zobrazování, detekce, identifikace, výbušniny, drogy, nebezpečné látky, skryté látky, ukryté předměty

ABSTRACT

In the theoretical section of this thesis the methods and technologies that use terahertz radiation in the electrocmagnetic spectrum, and their use in security applications are described. Diploma thesis in theoretical section describes the methods and technologies that use terahertz radiation in the electromagnetic spectrum, and their use in security applications. The paper successively describes the THz frequency region from different perspectives, which are methods of generation, transmission and detection of THz radiation, applications of THz technology, a description of the principles of THz imaging and spectroscopy . Along this, the work is devoted to the use of THz frequencies in security applications, to the selection of application guidelines related to security, and to the comparison of the security applications of THz waves with applications of other technologies. The conclusion of the theoretical section is oriented to the possibilities of development and research in relation to the FAI UTB, and an estimate of the future development of the terahertz range. The practical part includes sample preparation and Raman spectroscopy experiments.

Keywords: terahertz, THz, spectroscopy, imaging, detection, identification, explosives, drugs, hazardous materials, substances hidden, hidden objects

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc.RNDr. Vojtěchu Křesálkovi, CSc. za odborné vedení, věcné připomínky a rady při zpracovávání této práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a přátelům, kteří mě aktivně podporují nejen ve studiu, ale v celém životě.

Motto:

Kdo nic neví, nic nemiluje. Kdo nic neumí, nic nechápe. Kdo nic nechápe, je bezcenný. Ale ten, kdo chápe, ten i miluje, všímá si, vidí... Čím hlubší poznání, tím větší láska... Kdokoli si představuje, že všechny plody dozrávají současně s jahodami, neví nic o hroznech.

Paracelsus

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 V OBLASTI THZ FREKVENČÍ SPEKTRA	12
1.1 TERAHERTZOVÉ ZDROJE	13
1.1.1 Optická rektifikace	16
1.1.1.1 Optická rektifikace v polovodičovém povrchu	18
1.1.1.2 Optická rektifikace v anorganických elektro-optických krystalech	19
1.1.1.3 Optická rektifikace v organických elektro-optických krystalech	19
1.1.1.4 Účinnost konkrétních zdrojů	20
1.1.2 Generování THz záření pomocí rozdílové frekvence	21
1.1.3 Optické parametrické zesílení	22
1.1.4 Frekvenční multiplikování mikrovln	23
1.1.5 Foto-elektricky vodivé spínání	26
1.1.6 Foto-elektrické směšování	29
1.1.7 Elektronový urychlovač	32
1.1.8 Oscilátor zpětné vlny	34
1.1.9 Free-electron laser (laser volných elektronů)	35
1.1.10 Plynový laser	37
1.1.11 P-typ germaniový laser	39
1.1.12 Kvantové kaskádové lasery	41
1.2 TERAHERTZOVÉ DETEKTORY	43
1.2.1 Koherentní detektory	43
1.2.1.1 Elektro-optické vzorkování ve volném prostoru	45
1.2.1.2 Foto-elektricky vodivá anténa	47
1.2.1.3 Heterodynní detekce	49
1.2.2 Teplotní detektory	50
1.2.2.1 Bolometry	51
1.2.2.2 Pyroelektrické detektory	54
1.2.2.3 Golayovi články	56
1.3 TERAHERTZOVÁ OPTIKA	57
1.3.1 Zrcadla a čočky	57
1.3.2 Pásmové filtry	59
1.3.3 Vlnovody	59
2 APLIKACE TERAHERTZOVÉHO FREKVENČNÍHO PÁSMÁ	60

2.1	VESMÍR.....	60
2.2	SPEKTROSKOPIE	60
2.3	PRŮMYSL.....	61
2.4	KOMUNIKACE	61
2.5	SIMULACE PODPISŮ RADAROVÉHO ROZPTYLU	62
2.6	TERAHERTZOVÉ ZOBRAZOVÁNÍ	62
2.7	MEDICÍNA.....	63
3	VÝBĚR OBLASTÍ SOUVISEJÍCÍCH S BEZPEČNOSTNÍMI APLIKACEMI.....	64
3.1	IDENTIFIKACE VÝBUŠNIN, ZBRANÍ A DROG	65
3.2	METODY DETEKCE A IDENTIFIKACE V PRAXI	68
4	SROVNÁNÍ APLIKACÍ THZ VLN S PODOBNÝMI APLIKACEMI JINÝCH METOD OCHRANY OBJEKTŮ A OSOB.....	71
4.1	SROVNÁNÍ THZ A MILIMETROVÉHO ZOBRAZOVÁNÍ	71
4.2	DETEKTORY VÝBUŠNIN NA BÁZI DETEKCE PAR A STOPOVÝCH MNOŽSTVÍ VÝBUŠNIN A DROG	71
4.3	RENTGENY	72
5	PRINCIPY ZOBRAZOVACÍCH A SPEKTROSKOPICKÝCH THZ SYSTÉMŮ.....	74
5.1	ZOBRAZOVACÍ SYSTÉMY	74
5.1.1	Zobrazování s širokopásmovými THz pulzy	75
5.1.1.1	Zobrazování za pomoci amplitudy a fáze	75
5.1.1.2	2-D zobrazování v reálném čase	76
5.1.1.3	THz tomografie	77
5.1.2	Zobrazování se spojitým THz zářením.....	80
5.1.2.1	Zobrazování na bázi rastrového snímání	80
5.1.2.2	Zobrazovací systém založený na foto-elektrickém směšování.....	80
5.1.2.3	Zobrazování s oscilátorem zpětném vlny	81
5.1.2.4	Zobrazování v reálném čase za pomoci mikro-bolometrického snímače 82	
5.2	SPEKTROSKOPIE	83
5.2.1	Detekce tvaru THz vlny za použití jednoho laserového pulzu	84
5.2.2	Rozdílová THz spektroskopie	85
6	NÁVRH MOŽNOSTÍ THZ VÝZKUMU A VÝVOJE VE VZTAHU K UTB FAI.....	87
7	ODHAD PRAVDĚPODOBNÉHO VÝVOJE V THZ OBLASTI.....	89
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	91
8	VYTVOŘENÍ VZORKŮ PRO ANALÝZU V OBLASTI TERAHERTZOVÝCH FREKVENCÍ A VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU RAMANOVY SPEKTROSKOPIE.....	92

8.1	PŘÍPRAVA VZORKŮ.....	92
8.2	MĚŘENÍ ZA VYUŽITÍ RAMANOVY SPEKTROSKOPIE	93
ZÁVĚR		95
ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ		96
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY		97
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....		102
SEZNAM OBRÁZKŮ		103
SEZNAM TABULEK		106
SEZNAM PŘÍLOH		107
PŘÍLOHA P I: TABULKA VÝBUŠNIN A DROG S JEJICH CHARAKTERISTICKÝMI FREKVENCEMI POHLCENÍ V THZ OBLASTI [17]		108
PŘÍLOHA P II: PRACOVNÍ ČINNOST T 5000 [24].....		109

ÚVOD

Technologie terahertzových (THz) frekvencí se začaly ve větším měřítku rozvíjet až v devadesátých letech minulého století, přičemž hlavní hnací silou pro vývoj THz zdrojů a detektorů byla astronomie a chemie. [1] S rozvojem THz technologií se objevují nejrůznější aplikace. Toto odvětví se nachází v přechodovém stádiu, kde dochází ke značným pokrokům a je zde množství neprobádaných „zákoutů“. Oblast terahertzových technologií je často označována jako „THz gap“ (THz mezera - myšleno technologická) právě kvůli faktu, že na rozdíl od svého blízkého frekvenčního okolí dříve neexistovaly žádné technologie pro práci s THz frekvencemi a nebo byly velmi neúčinné.

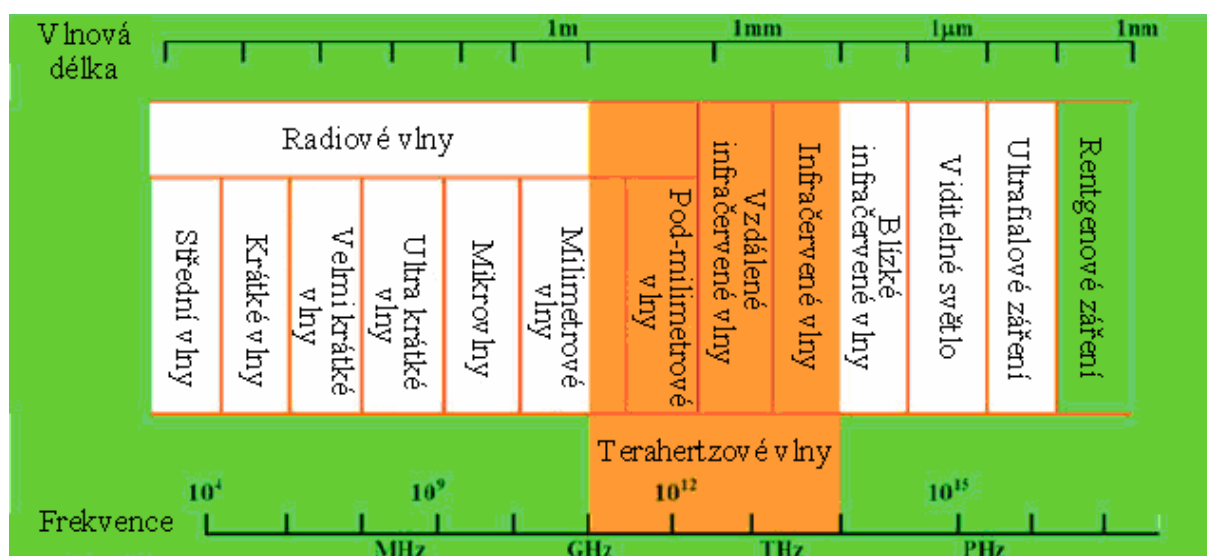
Tak jako se THz technologie a jejich aplikace rozvíjí s každým dnem je obtížné vytvořit komplexní literaturu, která by pojednávala o generování, detekování, vedení či šíření THz záření a o možnostech využití těchto technologií, aniž by nebyla během krátké doby překonána. V české literatuře je možné najít zmínku o THz technologiích, případně studentské práce, ale podrobně se jimi zatím nikdo nezabýval, což je důvod proč jsou informace pro tuto diplomovou práci získávány převážně z cizojazyčných zdrojů. Tato práce je tedy i jakýsi souhrn aktuálního stavu THz technologií a aplikací, především pak bezpečnostních, v českém jazyce, jež může být využita studenty pro další práci.

V České republice existuje zatím pouze jedna THz laboratoř a to Laboratoř terahertzové spektroskopie v Oddělení dielektrik ve Fyzikálním ústavu Akademie věd ČR. Výzkum této laboratoře je obecného zaměření – tzv. základní výzkum. Pravděpodobně druhou laboratoří bude v blízké budoucnosti THz laboratoř na Fakultě aplikované informatiky na UTB ve Zlíně, která bude orientována na aplikace (se zaměřením především na detekci výbušnin a drog) a je důvodem vzniku této práce.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 STÁVAJÍCÍ TECHNIKA V OBLASTI THZ FREKVENCÍ SPEKTRA

Terahertzové (THz) záření je elektromagnetické záření ležící na frekvenční ose mezi mikrovlnným a infračerveným zářením. Jedná se o lidským okem neviditelné záření, ale jsme ho schopni cítit jako teplo, jelikož sdílí část spektra se vzdáleným infračerveným zářením. I přesto, že se THz záření přirozeně vyskytuje běžně kolem nás, zůstala tato část spektra elektromagnetického záření nejméně prozkoumanou oblastí kvůli technickým nedostatkům ve vytvoření účinných a kompaktních THz zdrojů a detektorů.



Obr. 1 Rozdělení spektra elektromagnetického záření **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**]

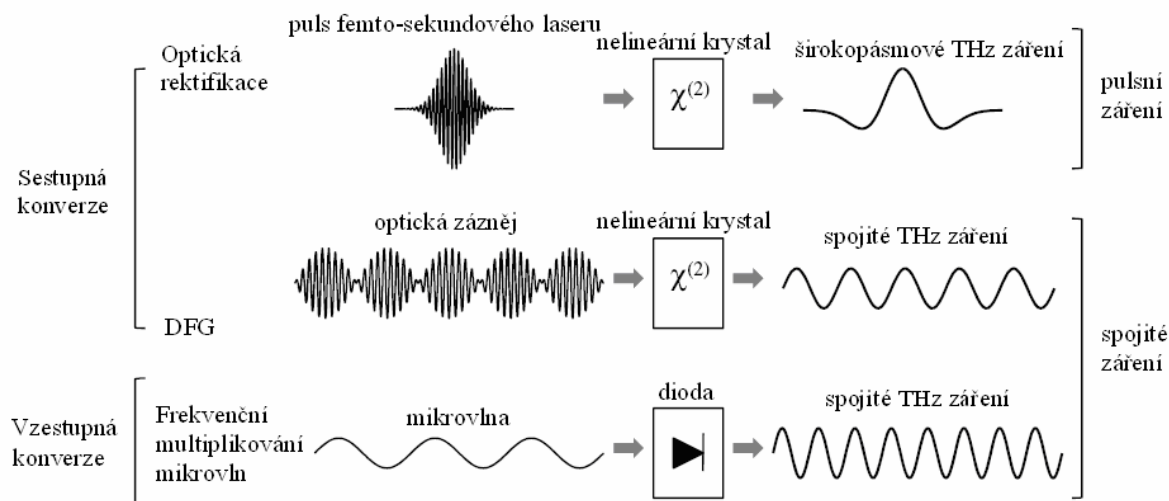
Zatím nebyl vytvořen žádný standard určující rozmezí THz frekvencí. Předpona „tera“ označuje 10^{12} , čili $1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$. Nejběžnější definicí je spektrální rozsah mezi 0.1 a 30 THz. Na obr. 1 je vidět vymezení THz oblasti spektra v rozmezí od 0.1 do 100 THz. Část této spektrální oblasti se kryje s oblastí vzdáleného infračerveného záření, pro které jsou technologie již vyvinuty, a tudíž se o ní nedá mluvit jako o THz technologické mezeře. THz techniku jsem v této práci rozdělil na zdroje, detektory a optiku.

1.1 Terahertzové zdroje

Existuje několik metod vytváření terahertzového záření. Tyto využívají principy vytváření záření ze spektrální oblasti mikrovln a také z opačné strany principy z oblasti vzdáleného infračerveného (IR) záření. Generování terahertzového záření je omezeno hned několika faktory. Jednak jde o technologická omezení související s vlastnostmi používaných materiálů (např. u polovodičů při vyšších frekvencích dochází kvůli přechodovému času k velkým ztrátám – tzv. roll-off), dále je to rozměrnost výkonných zdrojů, které sice vytvářejí silné terahertzové záření, ale jsou nevhodné pro většinu aplikací, zato malé zdroje vytvářejí méně intenzivní záření. Další omezení, které se týká spíše aplikací než vědeckých experimentů, je cenová dostupnost některých technologií, energetické ztráty při vytváření záření a pracovní teplota, která je omezením mnoha THz zdrojů, které vyžadují pro svou činnost kryogenické chlazení, což dělá z těchto zdrojů nepříliš praktické zařízení.

Generování terahertzového záření lze rozdělit podle různých kritérií – podle použité technologie vytváření záření, vlastností výsledného záření (pulzní - spojitě, širokopásmové – úzkopásmové) nebo také podle dosažitelného výkonu. Následně bude uveden stručný přehled jednotlivých technologií THz zdrojů a dosahovaného záření. Vzhledem k tomu, že jsou THz technologie stále ve vývoji, nejsou zde uvedeny všechny metody vytváření THz záření, ale pouze ty zásadní.

Jedním ze způsobů generování THz záření je ozáření nelineárního materiálu, ve kterém dojde k frekvenční konverzi příslušné elektromagnetické vlny. Optická rektifikace (OR) a směšování rozdílných frekvencí (DFG – difference frequency generation) jsou optické procesy druhého řádu, ve kterých je vytvářen THz foton o frekvenci f_T interakcí dvou optických fotonů o frekvencích f_1 a f_2 v nelineárním krystalu, kdy $f_T = f_1 - f_2$. Pulzy z femto-sekundového laseru s rozsáhlým spektrem (šířka pásma okolo 10THz) vytvářejí širokopásmové THz pulzy skrz optickou rektifikaci, jejichž obálka je podobná tvaru optických pulzů. Dva spojitě optické paprsky vytvářejí pomocí DFG spojitě THz záření. THz polovodičové zdroje založené na mikrovlnné technologii konvertování přichozích mikrovln na jejich harmonické vlny použitím diody se silně nelineární charakteristikou třídy I-V.



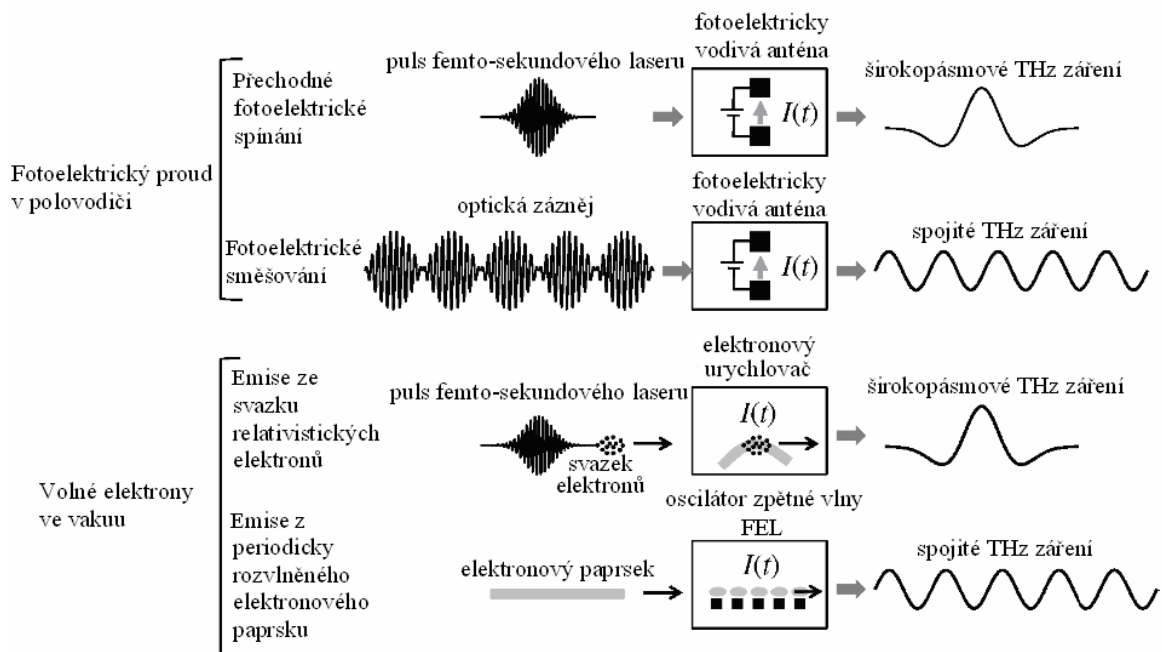
Obr. 2 Rozdělení THz zdrojů [2]

Urychlování nábojů a časově proměnné proudy vyzařují elektromagnetické vlny. THz záření může být vytvářeno z fotoelektricky vodivé (PC – photoconductive) antény s předpětím, ozářené laserovými paprsky. PC anténa je složena ze dvou kovových elektrod nanesených na polovodičovém podkladu (substrátu). Optický paprsek ozařující mezeru mezi elektrodami vytváří fotoelektrické nosiče a statické napěťové pole urychluje volné nosiče. Tento fotoelektrický proud se mění v čase v závislosti na intenzitě laserového paprsku, následkem čehož je vytvoření širokopásmových THz pulzů femto-sekundovým laserem. Směšování dvou laserových paprsků s rozdílnými frekvencemi formují optické záněje, které vytváří spojité THz záření o zánějové frekvenci. Tato metoda je nazývána fotoelektrické směšování (photomixing).

Elektronové urychlovače vytvářejí extrémně jasné THz záření pomocí relativistických elektronů. Pulzy femto-sekundového laseru budí elektronový zdroj ke generování ultra-krátkých pulzů elektronů. Po urychlení na relativistickou rychlost jsou elektrony vystřeleny na kovový cíl nebo jsou magnetickým polem donuceny kruhového pohybu. Tímto přechodným elektronovým urychlováním je vytvářeno koherentní THz záření.

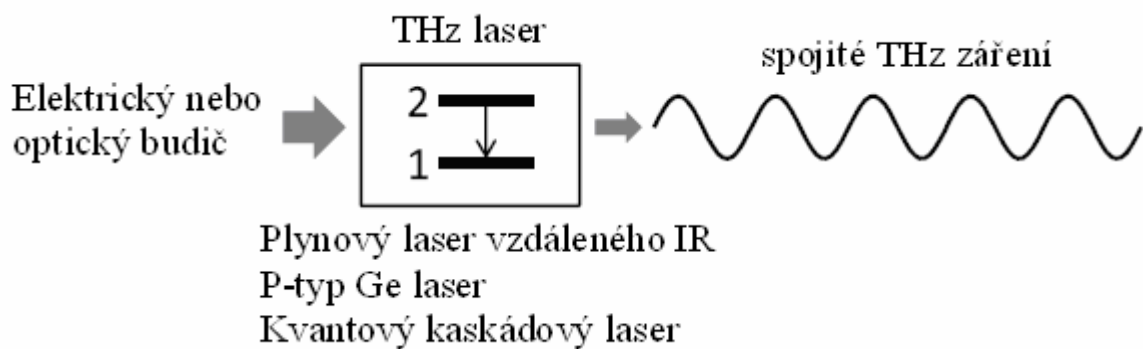
Oscilátory odražené vlny (BWO-backward wave oscillator) jsou zařízení laboratorní velikosti a „FEL“ (FEL – free-electron laser), elektronové urychlovače malého měřítka, jsou veliké zařízení. Na rozdíl od značného nepoměru velikostí těchto zdrojů zde existuje podobnost ve způsobu vytváření THz záření. V obou případech je elektronový paprsek

rozvlněn periodickou strukturou: BWO využívá kovové mřížky a FEL magnetického pole. Periodickým urychlováním elektronů je vytvářeno spojitě THz záření.



Obr. 3 Rozdělení THz zdrojů [2]

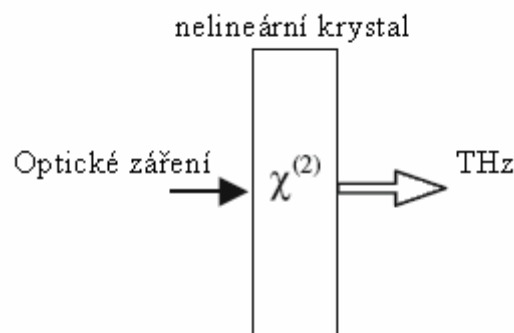
Činnost laseru vyžaduje inverzně obsazený dvouhladinový kvantový systém. Plynné lasery dalekého IR záření využívají úrovní molekulární rotační energie, jejichž přechodové frekvence spadají do THz oblasti. P-typ germaniové lasery jsou elektricky buzené polovodičové lasery. Jejich vyzařování spočívá v inverzním obsazení dvou Landauových úrovní formovaných horkými nosiči umístěnými do zkříženého elektrického pole s magnetickým. Kvantové kaskádové lasery (QCL – quantum cascade lasers) jsou polovodičové hetero-strukturní lasery skládající se z opakovaně se střídajících vrstev různých polovodičů. Přechod mezi subpásmy těchto polovodičových nano-struktur vyžaduje THz fotony. V QCL laserech elektrony podstoupí postupné přechody mezi jednotlivými subpásmy, což vytvoří koherentní THz záření. [2]



Obr. 4 Rozdělení THz zdrojů [2]

1.1.1 Optická rektifikace

Optická rektifikace (elektro-optická rektifikace) se řadí mezi nelineární optické jevy druhého řádu. Jedná se o konverzi záření z optického spektra na THz spektrum průchodem nelineárním materiálem.



Obr. 5 Schéma principu optické rektifikace

Princip optické rektifikace lze zjednodušeně popsat jako směšování dvou různých vzájemně blízkých frekvencí f_1 a f_2 , jejichž šířka pásem se pohybuje v oblasti optických pulzů. Výsledkem tohoto směšování je jediná frekvence f , která odpovídá rozdílu směšovaných frekvencí ($f = f_1 - f_2$). Výsledná frekvence je v THz spektru záření. Platí zde pravidlo, že čím jsou pulzy vstupních frekvencí kratší, tím je větší šířka výsledného pásma, což umožňuje směšovat i vzdálenější frekvence, a tím může dojít k rozšíření THz spektra.

Intenzita výsledného THz záření je závislá na intenzitě budícího pulzu, nelineárním koeficientu kvadratické susceptibility a fázovém synchronismu optických frekvencí. Intenzita THz signálu je druhou mocninou intenzity budícího pulzu, protože optická rektifikace je nelineární proces druhého řádu.

THz generování pomocí optické rektifikace může nastat v různých materiálech, proto je nezbytné rozlišovat mezi různými způsoby generování záření.

1. Energie fotonů je tak vysoká, že fotony dosáhly vodivé sféry v nelineárním materiálu. Fotony se uvolní z valenční sféry, což zapříčiní vyzáření volných nosičů, a nelineární koeficient susceptibility dosáhne nejvyšší možné hodnoty; tím dochází k zesílení rezonance. Tento typ optické rektifikace vede ke generování THz záření v materiálech, jako jsou polarizované polovodiče – jmenovitě GaAs nebo CdTe při buzení titan-safírovým laserem s vlnovou délkou 800nm.

2. Energie fotonů je tak nízká, že nedosáhnou vodivé sféry. Dojde pouze k vytvoření neharmonických potenciálů nosičů (virtuální přechod) a velmi důležitou se stává podmínka fázového synchronismu. Tento stav je obvykle charakterizován zářením, které lze popsat jako rozdíl mezi indexem lomu svazku optických pulzů a indexem lomu THz frekvencí. Typickým příkladem materiálů, u kterých je změna nerezonantní, a dozívající stav téměř mizí kvůli budícímu záření o vlnové délce blízké k 800nm je ZnTe. V tomto materiálu je efektivita optické rektifikace limitována procesem dvoufotonové absorpce, která při vysokých budících intenzitách není zanedbatelná. [3]

Materiály krystalů používané pro generování pomocí terahertzové optické rektifikace[4]:

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

Anorganické elektro-optické krystaly - LiNbO₃ , LiTaO₃.

Organické elektro-optické krystaly - 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

Experimenty na začátku 90.let ukázaly, že lze vytvářet THz záření také pomocí optické rektifikace, kdy je ozařován povrch polovodiče femto-sekundovými optickými pulzy. [5]

Z počátku nebylo jasné, co je příčinou vzniku THz záření na povrchu polovodičů. V roce 1992 Chuang navrhl teoretický model založený na optické rektifikaci femto-sekundových laserových pulzů na povrchu polovodiče, který úspěšně vysvětlil všechna předchozí experimentální pozorování. Investigace fyzikální podstaty optické rektifikace v závislosti na optické směrově závislé intenzitě ukazuje, že generování THz záření optickou rektifikací, je buď nelineární optický proces druhého řádu řízený tenzorem rozsáhlé susceptibility druhého řádu, nebo nelineární optický proces třetího řádu, pomocí něhož nelineární susceptibilita druhého řádu vyplývá ze směšování statického vyprázdněného pole povrchu a tenzoru nelineární susceptibility třetího řádu. [6]

Generování THz záření optickou rektifikací femto-sekundových laserových pulzů bylo zaznamenáno z krystalů o tvarech $\{100\}$, $\{110\}$, $\{111\}$ s běžně se vyskytující sfaleritovou strukturou polovodičů - většinou III-V (někdy II-VI) řádu. Experimentální studie s krystaly $\{100\}$, $\{110\}$, $\{111\}$ GaAs, CdTe a InP a $\{110\}$ GaP se naprosto shodovaly s teoretickými výsledky, což je důkaz, že rozsáhlá optická rektifikace druhého řádu je hlavním nelineárním procesem za podmínky průměrné optické směrově závislé intenzity (nJ/cm^2) a kolmého dopadu budícího záření na polovodič bez přivedeného napětí. [4]

Také bylo získáno THz záření z krystalů úzkopásmových polovodičů InAs a InSb při vysoké optické směrově závislé intenzitě ($1\text{-}2 \text{ mJ}/\text{cm}^2$) a s nekolmými dopady budícího záření. [7] Změnou úhlu dopadu budícího paprsku na krystal je možné dosáhnout různé účinnosti generování THz záření.

Pravděpodobně nejvýznamnějším krystalem se sfaleritovou strukturou je ZnTe. Poprvé ho představila ve svém experimentu Nahata [8], která použila krystal jak pro generování tak pro detekci s budícím mode-lock titanovým safírovým laserem.

Mimo krystaly se sfaleritovou strukturou je slibným polovodičovým krystalem GaSe, který vytváří THz záření s velkou šířkou pásma až do 41 THz. [9]

Pro generování a detekování širokopásmového THz záření využívajícího laserového zdroje s délkou pulzu kratší než 20fs je výkon soustavy vysílače a přijímače GaSe krystalu srovnatelný a možná i větší než při použití tenkých ZnTe krystalů. Použitím GaSe krystalů vhodné tloušťky vysílače a detektoru je také možné získat frekvenčně selektivní THz vlny. Nevýhodou GaSe je křehkost materiálu, která musí být během používání brána v potaz. [4]

1.1.1.2 Optická rektifikace v anorganických elektro-optických krystalech

Typickým představitelem anorganických elektro-optických krystalů pro generování THz záření za pomoci optické rektifikace je LiNbO₃. Za využití LiNbO₃ krystalu bylo vytvořeno terahertzové záření již na přelomu 60. a 70. let, kdy bylo cílem mnoha výzkumů dosáhnout laditelného koherentního dalekého infračerveného záření vytvářeného pomocí optických technologií. [10]

Krystal LiNbO₃ je často používaným krystalem v mnoha experimentech využívajících optickou rektifikace. Velkou výhodou je jeho dostupnost.

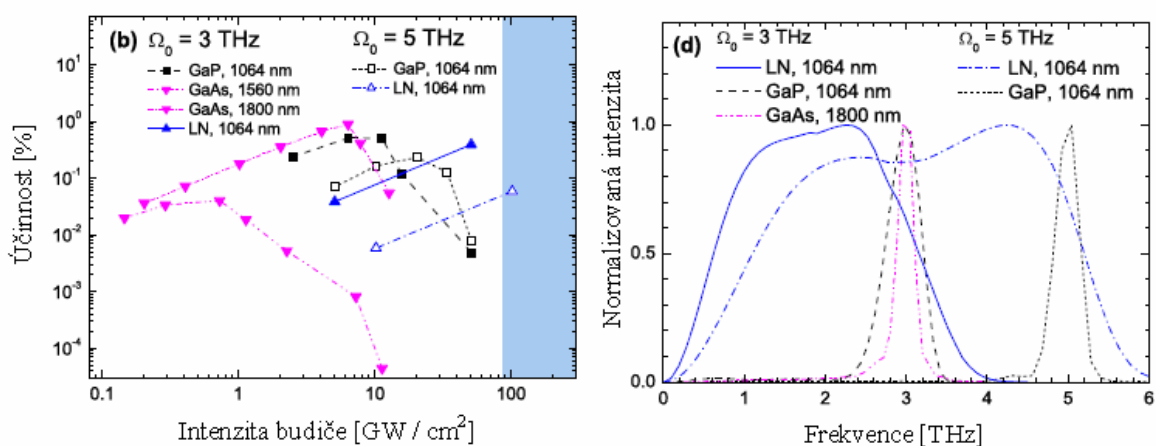
1.1.1.3 Optická rektifikace v organických elektro-optických krystalech

Typickým reprezentantem této skupiny materiálů krystalů je DAST. Důvody pro vzrůstající zájem o získávání vysoce kvalitních DAST krystalů jsou jejich mimořádně vysoké nelinearity, vysoké koeficienty optické a elektro-optické nelinearity druhého řádu, které jsou (ve stejném pořadí) deseti- a dvounásobně větší, než běžně vykazuje anorganický krystal LiNbO₃. [11]

Výhodou DAST organického krystalu je, že může být použit při experimentech s budicím laserem s telekomunikační vlnovou délkou 1.5 μm. Při takovémto experimentu se rozšíří spektrum na hodnoty od 1.3 do 4.8 THz s velmi vysokou účinností konverze (max E_{THz} odpovídá 50 kV/cm při optickém budicím pulzu o energii 25 μJ v 0,6mm silném krystalu). [12]

Nadto jsou ultrarychlé vláknové lasery v porovnání s titan-safírovými lasery malé, což může vést v blízké budoucnosti k tomu, že si spektroskopické THz zařízení vložíte do kufříku. [3]

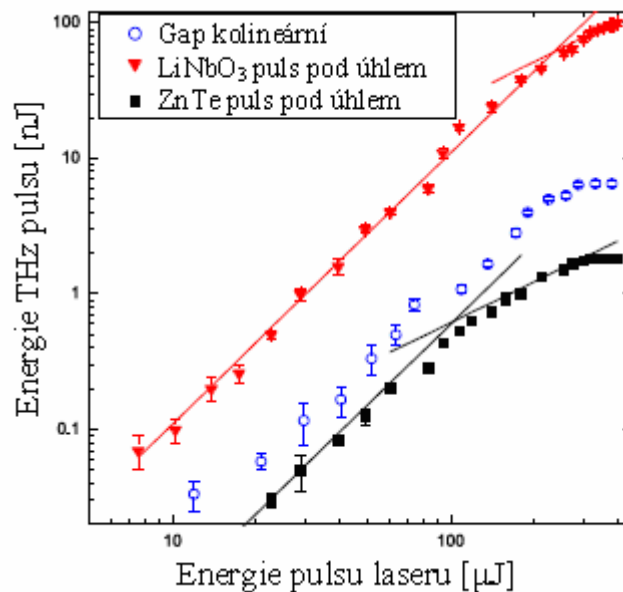
1.1.1.4 Účinnost konkrétních zdrojů



Obr. 6 Grafy účinnosti THz záření získaného OR [13]

V grafu vlevo je zobrazena závislost efektivity generování THz záření (pro dvě frekvence – 3 a 5 THz) na intenzitě budícího záření pro různé materiály krystalů a vlnové délky budících pulzů. V grafu na pravé straně je zobrazena normalizovaná intenzita generovaného záření v závislosti na generované frekvenci THz záření pro různé krystaly a vlnové délky budícího záření. Na tomto grafu lze jasně vidět srovnání kombinací krystalů a vlnových délek budícího záření pro dosažení určité intenzity konkrétní THz frekvence. [13]

Polovodiče mohou být výhodné pro generování THz pulzů s vysokou spektrální intenzitou při vysokých frekvencích, zatímco $LiNbO_3$ je vhodnější pro generování THz pulzů s velmi rozlehlou relativní spektrální šířkou.



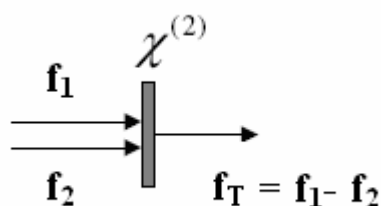
Obr. 7 Graf závislosti energie THz pulzu na energii pulsu budícího laseru [14]

Na grafu je zobrazena závislost energie THz záření produkovaného krystalem na energii budícího záření o vlnové délce 1035nm. Budící paprsek byl přiveden kolmo na plochu krystalu GaP a na krystaly LiNbO₃; ZnTe byl přiveden pod určitým sklonem. [14]

1.1.2 Generování THz záření pomocí rozdílové frekvence

Generování záření pomocí rozdílové frekvence (DFG) je nelineární optický proces druhého řádu, který vytváří elektromagnetickou vlnu o frekvenci $f_T = f_1 - f_2$, kde f_1 a f_2 jsou vstupní frekvence v optickém spektru. Optické vlny jsou přivedeny na nelineární krystal a výsledná frekvence je jejich rozdílem.

Optická rektifikace může být s patřičnými komponenty označena za DFG ale bez širokopásmových ultrakrátkých laserových pulzů. V této části budou rozebrány dvě metody vytváření úzkopásmového THz záření: DFG s dvěma vstupními paprsky a parametrické generování s jediným optickým budičem.



Obr. 8 Schéma principu DFG [2]

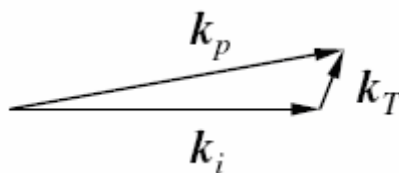
Na obrázku (Obr. 8) je jednoduché schéma principu DFG, jakožto nelineárního optického procesu druhého řádu, který vyžaduje necentrosymetrický krystal. Pro jednoduchost předpokládáme velmi tenký krystal a zanedbáváme jakékoliv jevy spojené s šířením vln. Podobně jako u fotoelektrického směšování, optickým zdrojem pro DFG jsou dva úzkopásmové laserové paprsky s malým frekvenčním rozdílem (f_1 a f_2). Když se šíří optické paprsky po stejné dráze a jsou polarizovány ve stejném směru, jejich interference představuje záznej, která osciluje na rozdílové neboli záznejové frekvenci $f_T = f_1 - f_2$; $f_1 > f_2$.

Mezi mnoha nelineárními krystaly vyzkoušenými pro DFG, je pro THz generování nejúčinnější GaAs. V krystalech z nelineárních materiálů LiNbO₃, GaP a DAST bylo THz vyzařování pomocí DFG dosaženo, ale účinnost těchto materiálů je podstatně nižší než u GaAs, který má několik význačných vlastností. Za prvé jeho koeficient optické nelinearity druhého řádu je velmi vysoký a za druhé je možné docílit fázového synchronismu s optickými budícími paprsky v rozsahu infračerveného záření. Výstupní THz frekvence je plynule laditelná v širokém spektrálním rozsahu od 0,2 do 5,3 THz. Za třetí je v krystalu GaSe poměrně nízká lineární absorpce záření v THz spektru. [2]

1.1.3 Optické parametrické zesílení

Optické parametrické generování je nelineární optický proces druhého řádu, ve kterém je foton budícího pulzu přetvořen na dva fotony s nižšími energiemi. Součet těchto dvou fotonových energií se rovná energii budícího fotonu: $E_p = E_i - E_T$, kde budící E_p a jalový E_i

foton jsou v optickém frekvenčním spektru a signálový E_T foton je ve spektru THz. Pokud je splněna podmínka fázového synchronismu jalové a signálové složky, dojde k zesílení vln.



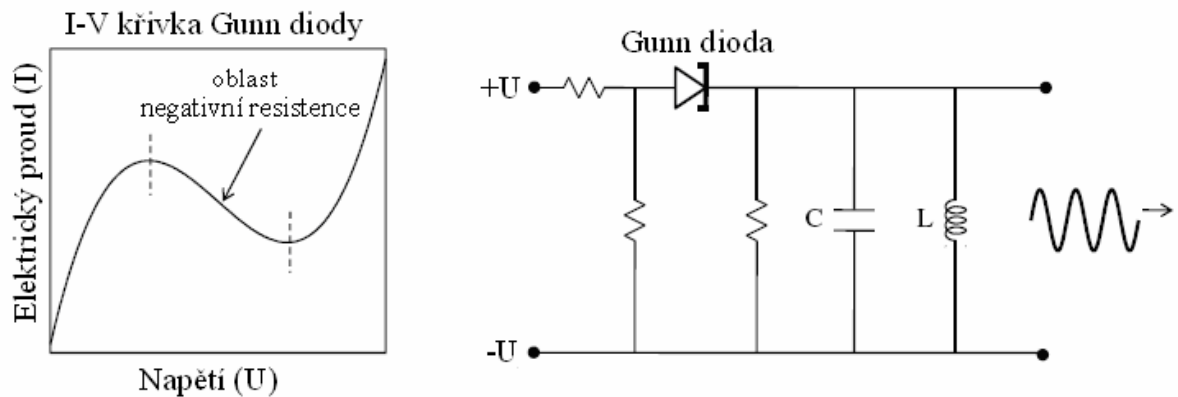
Obr. 9 Fázový synchronismus v krystalu LiNbO_3 pro OPA [2]

Parametrický proces je možné využít pro vytvoření laditelných úzkopásmových THz vln v LiNbO_3 krystalech. Obrázek (Obr. 9) představuje vztah fázových vektorů optické k_p , jalové k_i a THz k_T vlny. Tyto vektory nejsou sfázovány kolineárně. THz frekvenci je možné plynule ladit změnami úhlu mezi budicí a jalovou vlnou. [2]

1.1.4 Frekvenční multiplikování mikrovln

Další metoda polovodičových THz zdrojů je převzata z mikrovlnných technologií. Odebíráním výstupu z mikrovlnného syntetizéru (high-end modely schopné generovat výstupní signál ve frekvenčním rozsahu od 10 do 100 GHz) jako vstupního signálu, polovodičové THz zdroje multiplikuji frekvenci příchozí mikrovlny pomocí Schottkyho bariérové diody. Mikrovlnné syntetizéry a frekvenční multiplikátory jsou výrobky sofistikovaného inženýrství zahrnující elektronické technologie.

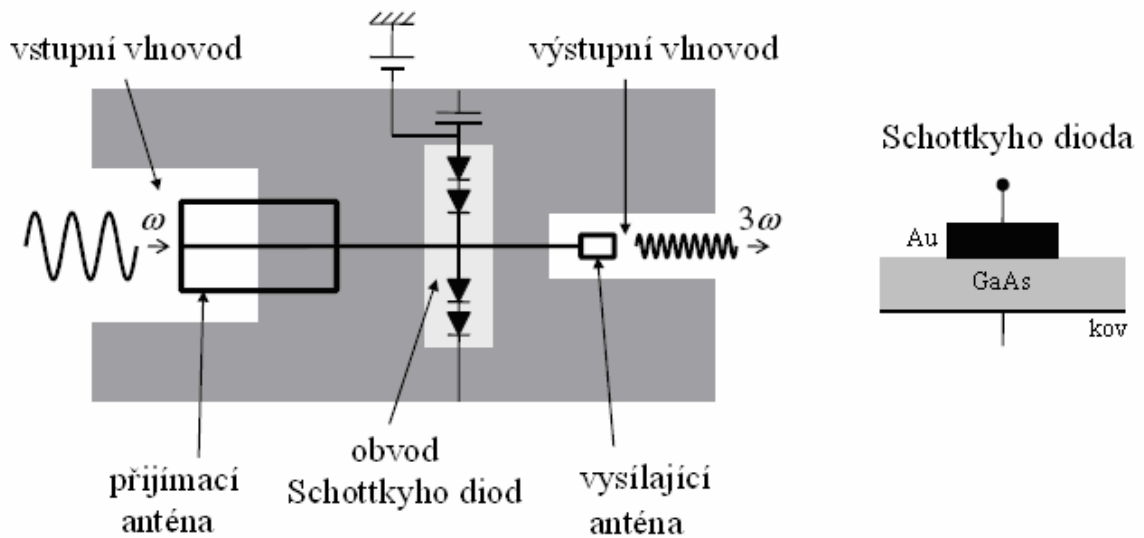
Mikrovlnné polovodičové zdroje zahrnují Gunn a tunelové diody. Jsou to dvoupólové součástky s negativní resistencí. Když jsou tyto zařízení připojeny na rezonátor přemění stejnosměrný elektrický signál na střídavý signál s frekvencí v oblasti mikrovln. Klíčovou vlastností tohoto mikrovlnného generování je negativní resistance, jak ukazuje křivka I-V (Obr. 10). Také je zde vidět zjednodušené schéma obvodu pro mikrovlnný oscilátor. Pokud odpovídá velikost negativní resistance diody resistenci oscilátoru, obvod osciluje bez útlumu a proto vyzařuje spojitou elektromagnetickou vlnu.



Obr. 10 Gunn dioda – VA charakteristika, konvertor [2]

Nejběžnější technikou pro vytváření nízkoenergetického záření o frekvencích větších než 500GHz je nelineární reaktivní multiplikace nízkofrekvenčních oscilátorů. Primitivními zdroji milimetrových vln byly zdroje z polovodičových látek (Gunn a IMPATT diody) a trubicové zdroje (karcinotrony, klystrony a oscilátory zpětné vlny). Dnes je nejčastější používání zdrojů vzestupného směšování z mikrovlnných frekvencí (20-40GHz).

Koncepčně je frekvenční multiplikování mikrovln obdobné jako harmonické generování optických vln v nelineárním krystalu. Ve frekvenčním multiplikátoru fungují Schottky diody jako nelineární činitelé přeměňující příchozí mikrovlny na své harmonické vlny. Schottky dioda užívá spoje kovu a polovodiče známého jako Schottkyho bariéra. Vysoká vodivost kovového kontaktu zapříčiní velmi vysokou frekvenci spínání (nad 10GHz). Na obrázku (Obr. 11) je zobrazeno schéma frekvenčního triplikátoru. Triplikátor vyrobený z jednoho kusu na GaAs struktuře obsahuje sadu Schottkyho diod. Zařízení sestává z přijímací a vysílací antény, vstupního a výstupního vlnovodu a obvodu pro generování harmonického signálu. Účinnost generování třetí harmonické závisí na optimalizaci návrhu tvaru a rozměrů prvků obvodu.



Obr. 11 Triplikátor s obvodem Schottkyho diody, Schottkyho dioda [2]

Polovodičové THz zářiče jsou kompaktní, pracující při pokojové teplotě a s úzkým pásmem. Průměrný výstupní výkon při frekvenci 1 THz je typicky v rozsahu 10-100 μ W. [2]

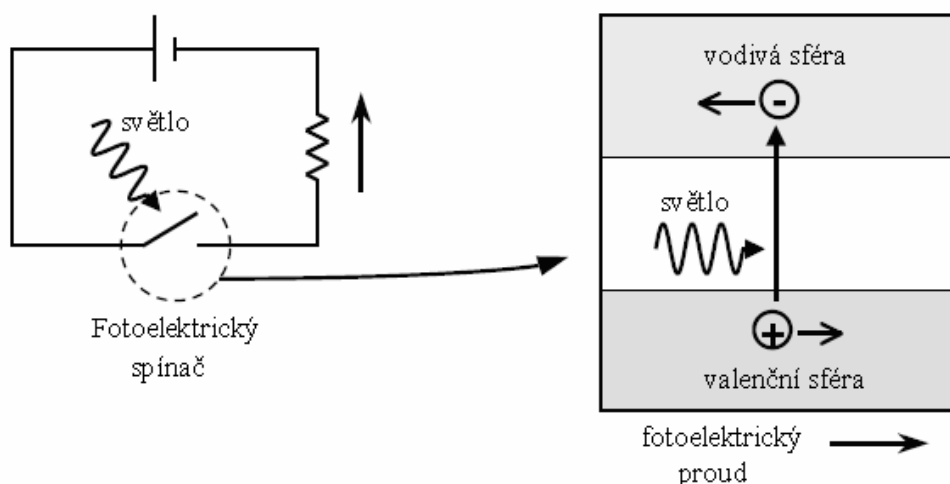
Zařízení s vyššími frekvencemi (až 200 GHz) jako Gunn, IMPATT a TUNNETT jsou ve vývoji, ale zatím nejsou komerčně dostupné. Naštěstí, pokroky ve vývoji MMIC (monolitické mikrovlnné integrované obvody) v polovodičové skupině III-V rozšířily základní frekvenční pásmo až na 200 GHz. Převedení mikrovlnného pásma na pásmo terahertzové vyžaduje vícenásobnou multiplikaci. V porovnání se zdvojovači nebo triplikátory mají multiplikátory s vícenásobnou multiplikací (více než 4x) malou účinnost konverze. Nejefektivnější zdroj terahertzového záření je uspořádán ze série nízko řádových multiplikátorů. Jako zdroje multiplikování se nejběžněji používají GaAs Schottkyho bariérové diody instalované do jedno vidového vlnovodu. „Řetězy“ multiplikátorů dosahují 1200 GHz s 75mikroW při pokojové teplotě a přes 250 mikroW při pracovní teplotě 120K. Touto technikou byly získány signály až do 2.7 THz a je neustále ve vývoji. [1]

1.1.5 Foto-elektricky vodivé spínání

Fotoelektricky vodivá anténa, ve tvaru dipólu je jedním z nejběžněji používaných detektorů a vysílačů pro THz záření. [1]

Fotoelektricky vodivá (PC) anténa je elektrický spínač využívající vzrůst elektrické vodivosti polovodičů a izolantů při vystavení světelnému záření. Fotoelektrická vodivost vychází z nárůstu počtu volných nosičů – elektronů a děr – vytvořených fotony. Fotonová energie musí být značně velká pro překročení spodní hranice vodivosti materiálu.

Na obrázku (Obr. 12) vidíme jednoduchý obvod s PC spínačem a rezistorem. Obvodem protéká proud v momentě, kdy světlo vytvoří volné elektrony a díry.



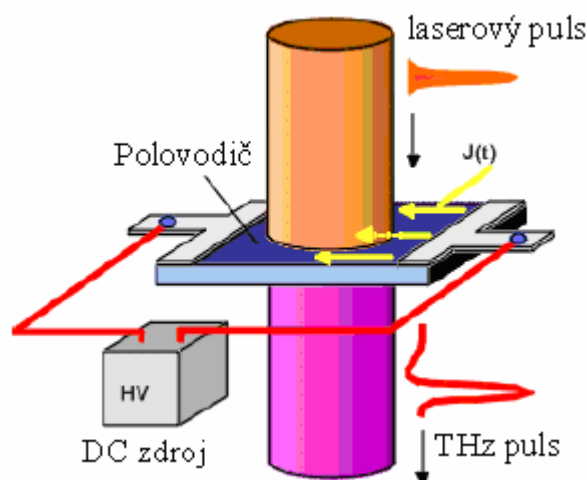
Obr. 12 Fotoelektrický spínač [2]

Za účelem vyzáření nebo detekování THz záření by se měl proces spínání v PC anténě odehrávat v čase menším než 1 ps. Sepnutí v určitém čase je funkcí četnosti pulzů laseru a času rozepnutí spínače daného především životností nabuzeného nosiče v polovodičovém substrátu antény a proto je pro ultra rychlé fotoelektricky vodivé spínání životně důležitou vlastností hustota krátkých laserových pulzů a nízká životnost nosičů. Vysoká pohyblivost nosičů a vysoké průrazné napětí jsou také žádoucí pro velmi kvalitní fotoelektricky vodivý materiál. Bylo testováno několik fotoelektricky vodivých materiálů pro PC spínače: galium

arsenid zahřátý na nízkou teplotu (LT-GaAs), zářením narušený silikon na safíru (RD-SOS), chromem dopovaný galium arsenid (Cr-GaAs), indium fosfát (InP) a amorfni silikon.

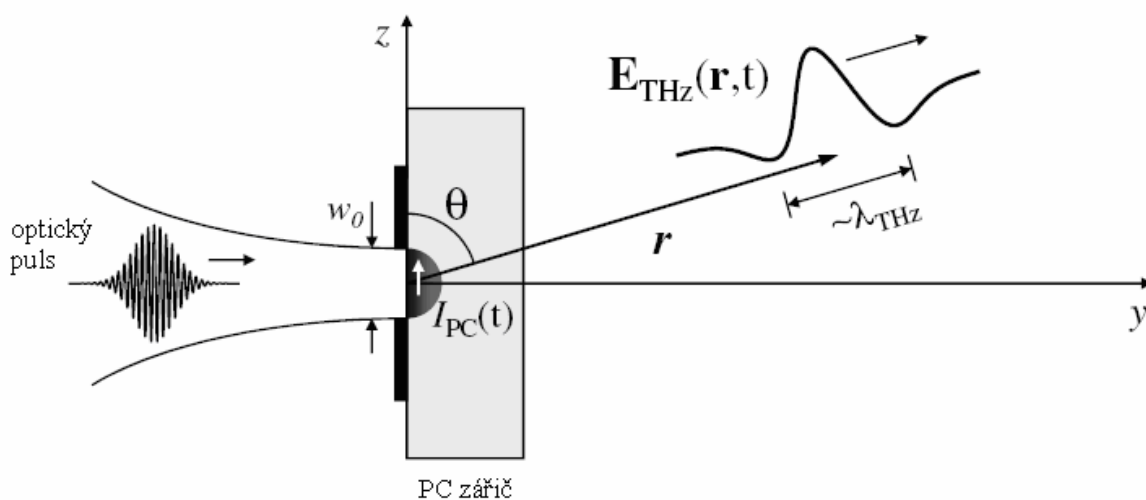
Nejčastěji používané materiály pro THz vysílače a detektory jsou RD-SOS a LT-GaAs. Životnost jejich nosičů je menším než 1 ps. Velmi malá životnost nosičů vyplývá z vysoké koncentrace defektů, kterými jsou nosiče zachycovány a rekombinovány. Defekty v RD-SOS jsou O^+ ionty vytvořené „iontovým bombardováním“. Hustota defektů může být řízena množstvím iontových implantátů. LT-GaAs je zvětšen epitaxi molekulárního paprsku při nízkých teplotách substrátu (okolo 200 °C). Nárůst je následován prudkým zchlazením. Tento materiál vykazuje vysokou hustotu defektů jako jsou As atomy obsazené v mřížce na místě Ga, As intersticiální atomy a Ga vakance. Vzorok LT-GaAs zahřáté na teplotu mezi 180 a 240°C mají životnost nosičů menší než 1 ps. Nejkratší životnost okolo 0,2 ps je dosažena ohřevem na teploty blízké 200 °C.

THz pulzy s periodou menší než 1 ps mohou být vytvořeny pomocí fotoelektricky vodivé antény ozářené femto-sekundovým laserem. THz vysílač má dvě kovové elektrody nanesené na polovodičovém základu (substrátu). Na elektrody je přivedeno stejnosměrné napětí. Femto-sekundové optické pulzy s fotonovou energií vyšší než je spodní hranice vodivosti polovodiče vytvářejí páry elektron – díra v prostoru mezi elektrodami. Statické napěťové pole urychluje volné elektrony a současně klesá hustota nábojů především zachycováním nosičů v defektních místech v momentě konce životnosti nosičů. Zrychlením a úbytkem volných nosičů vzniká impulzní proud, což je zdroj pulzů elektromagnetického záření s periodou menší než 1 ps.



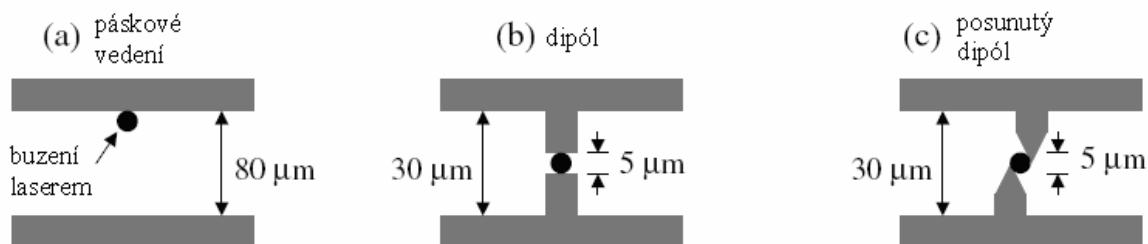
Obr. 13 Nákres modelu PC antény [15]

Zdroj záření PC zářiče může být tvarován jako Hertzova dipólová anténa, jejíž velikost je mnohem menší než vlnová délka vyzařovaného záření.



Obr. 14 Schematické znázornění principu PC antény [2]

Kovové elektrody mohou mít různou strukturu. Použitím jednotlivých struktur dosáhneme různých výkonů a šířky pásma THz záření z PC spínačů. Na obrázku (Obr. 15) jsou ukázány běžně používané struktury elektrod PC spínačů.



Obr. 15 Struktury elektrod PC antén [2]

Pro strukturu rovnoběžných pásků je hustota pulzů menší než pro strukturu dipólu. Spektrum amplitudy dosahuje až 4 THz, které jsou částečně omezeny časem detekční odezvy. THz záření ze struktury dipólu má užší pásmo a nižší frekvenční maximum, ale

mnohem větší výkon při stejném optickém budicím záření a stejnosměrném napětí. Účinnost THz generování může být vylepšena optimalizováním struktury elektrod.

Výstupní výkon PC zářiče závisí na napětí a výkonu optického budiče. Pokud je výkon optického budiče nízký a napěťové pole je slabé amplituda vyzařovaného pole roste lineárně s oběma parametry. Maximální výkon záření je limitován průrazným napětím materiálu substrátu. [2]

Shrnutí v bodech [16] :

Výhody:

- vysoká prostorová kvalita
- přiměřená šířka pásma pro časově rozlišenou spektroskopii (okolo 2 THz)
- možnost nastavení frekvence až do 2,5 THz

Nevýhody:

- nízký výkon (THz v řádech μW při buzení 1 W laserem ultra krátkých pulzů, stovky mW v maximu)
- relativně komplikované kvůli nutnosti laseru ultra krátkých pulzů
- vysoká pořizovací cena
- zatím stále rozměrné

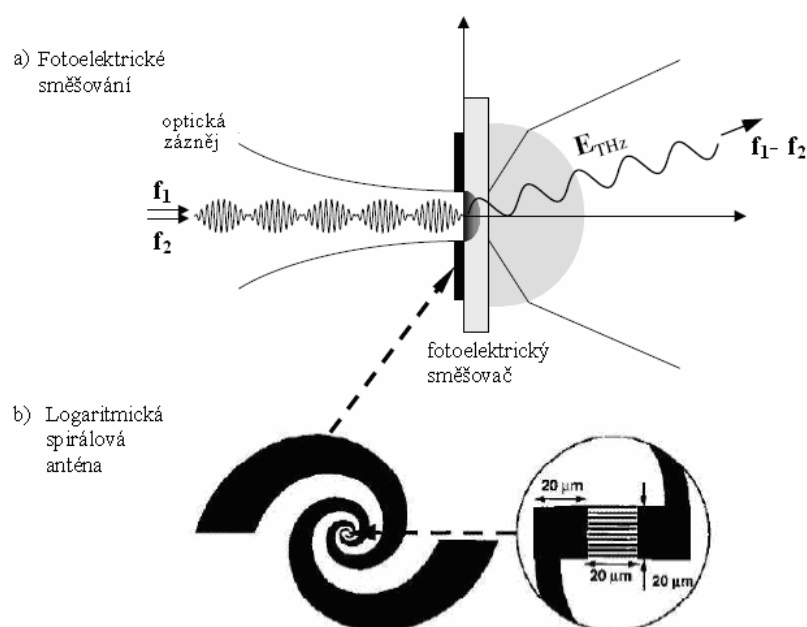
1.1.6 Foto-elektrické směšování

Fotoelektrické směšování, také známé jako optická heterodynní sestupná frekvenční konverze je způsob generování spojitého THz záření s foto-elektricky vodivými spínači. Foto-elektrický směšovač je kompaktní polovodičové zařízení. [2]

Foto-směšování je generování spojitě vlny terahertzového záření směšováním dvou spojitých vln laserů s identickou polarizací, která je zaostřena na foto-směšovací zařízení. V této metodě je využito prostorového překrývání signálů dvou laserů s frekvencemi f_1 a f_2 ke generování THz paprsku. Kolineární lasery ozařují polovodič. Nízký teplotní nárůst polovodiče vede k vytvoření velmi rychlých fotoelektricky citlivých diod s velmi krátkou životností nosičů. Nízká teplota polovodiče poskytuje také vhodnou pohyblivost optických nosičů. [1]

Rozsah ladění může být obrovský v případě, že bude dostupný vysoce kvalitní, laditelný, dvou frekvenční laserový systém. Hlavní nevýhodou této metody je, že výstupní výkon je relativně nízký v porovnání s ostatními metodami vytváření spojitého THz záření. Účinnost sestupné konverze z optických vln na THz je 10^{-6} - 10^{-5} a typický výstupní výkon je v řádech mikrowattů. Nejčastěji používaným materiálem pro tuto metodu je LT-GaAs kvůli vysoké pohyblivosti a krátké životnosti nosičů. Přenos nosičů v LT-GaAs je důležitým činitelem řídícím proces foto-elektrického směšování. Foto-elektrické směšování vyžaduje spojitě optické buzení a proto je maximální THz výstupní výkon omezen nízkou tepelnou vodivostí LT-GaAs (okolo 15 W/mK).

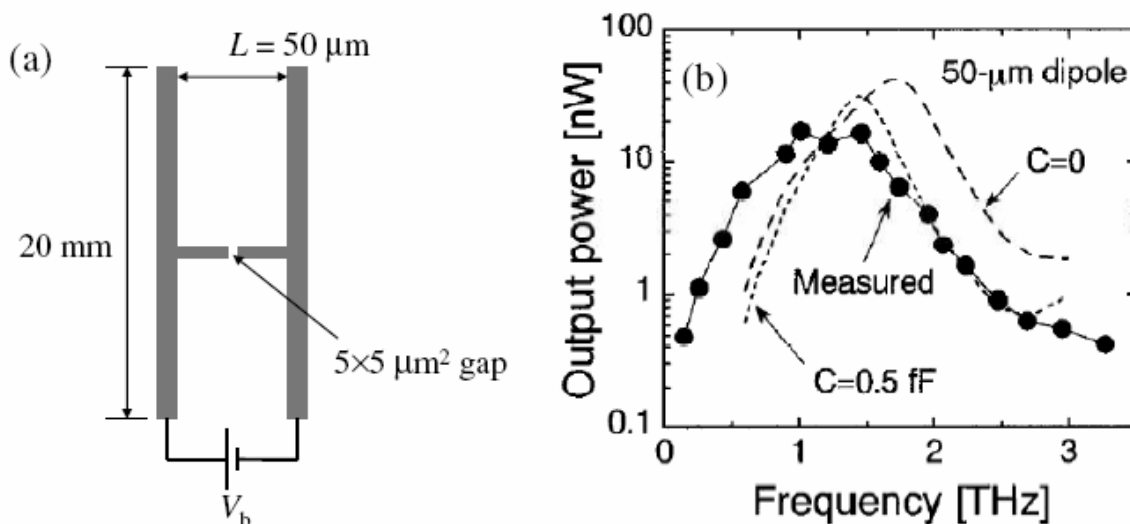
Na obrázku (Obr. 16a) je vidět princip vytváření spojitého THz záření pomocí fotoelektrického směšování. Typický foto-elektrický směšovač obsahuje kovovou anténní strukturu na vrstvě LT-GaAs vytvořené na SI-GaAs substrátu. Silikonové hyperhemisferické čočky jsou nanášeny na zadní straně substrátu. Běžně používanou strukturou antény pro foto-elektrické směšování je logaritmická unipolární spirálovitá anténa s do sebe zapadajícími tyčinkami, jak je zobrazeno na (Obr. 16b).



Obr. 16 a) Princip fotoelektrického směšování, b) Detail logaritmické spirálové antény [2]

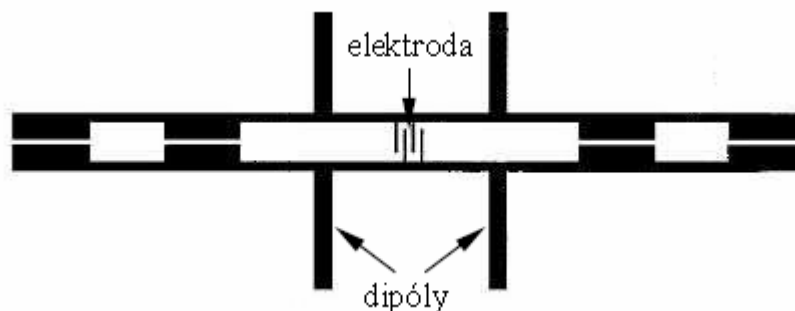
Optické buzení foto-elektrického směšování využívá záněže mezi dvěmi spojitými laserovými paprsky s mírně odlišnými frekvencemi. Nejběžnějšími světelnými zdroji jsou diodové lasery se spektrálním rozsahem mezi 800 a 850nm. THz záření je získáno, když je rozdíl mezi frekvencemi nastaven na frekvenční rozsah THz.

Na úkor širokého rozsahu ladění má logaritmická spirálová anténa nízký výstupní výkon kvůli poměrně nízkému vyzařovacímu odporu. Výkon záření může být zesílen použitím resonantní struktury antény. Na obrázku (Obr. 17) je struktura dipólové PC antény a spektrum jejího výkonu záření v THz rozsahu, kde L je vzdálenost mezi rovnoběžnými částmi antény.



Obr. 17 a) PC anténní dipól, b) Graf závislosti výstupního výkonu na frekvenci pro PC anténu [2]

Použitím více sofistikovaných anténních struktur je možné dosáhnout větších výstupních výkonů. Oproti jednoduché anténě má anténa s dvojitým dipólem (Obr. 18) několik výhod: charakter záření je více symetrický a vyzařovací odpor je vyšší.



Obr. 18 PC anténa s dvojitým dipólem [2]

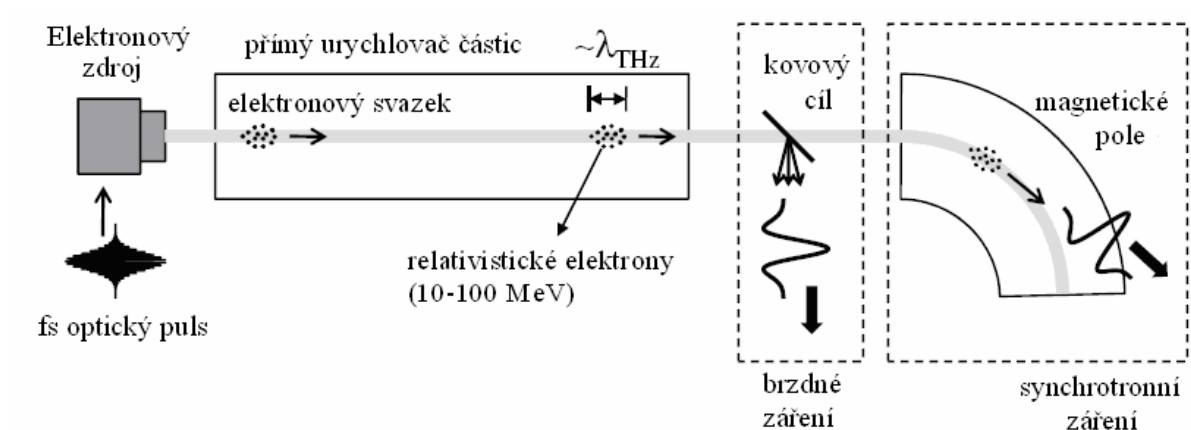
Základní vlastností duálního anténního designu je kapacita elektrod, která je vyrušena induktivním laděním, pokud je délka pásů přechodu nastavena na rezonanční frekvenci. Proto je odpor záření dán hlavně životností nosičů. Výstupní spektrum duálních dipólových antén vykazuje značně vyšší výstupní výkon blízko jejich rezonančním frekvencím v porovnání s výstupem z logaritmické spirálové antény. [2]

1.1.7 Elektronový urychlovač

Elektronové urychlovače jsou výjimečné světelné zdroje charakteristické vysokým jasem a širokým rozsahem ladění. Výkon THz zdrojů založených na urychlovačích je o několik řádů vyšší než ostatní THz zdroje. Urychlené relativistické elektrony vytvoří záření ve tvaru úzkého kuželu ve směru jejich rychlosti.

Jednou z metod vytváření záření využívající vysoké rychlosti elektronů je vystřelení elektronového paprsku na kovový cíl, který značně zpomalí elektrony. Záření vytvořené zpomalením elektronů je nazýváno „brzdné záření“.

Záření vytvořené relativistickým elektronem podstupujícím kruhový pohyb je nazýváno synchrotronové záření, protože bylo poprvé pozorováno v elektronovém synchrotronu. Pro vytvoření pulzního záření je seskupováno mnoho elektronů a dále s nimi manipulováno ve shlcích. Když je velikost elektronového svazku srovnatelná s vlnovou délkou záření, emise jednotlivých elektronů ve fázi se navrství a celkový vyzařovací výkon odpovídá druhé mocnině počtu elektronů. Následkem toho je potenciálně velmi výkonné koherentní THz záření z elektronového svazku, který obsahuje velké množství elektronů.



Obr. 19 Schéma THz zdroje - urychlovač částic [2]

Pulzy femto-sekundového laseru spouští elektronový zdroj – pro vytvoření elektronových svazků se používá buď foto-elektrické katodové elektronové dělo nebo metoda využívající povrchů polovodičů. V urychlovači roste relativistická energie elektronů na 10-100 MeV a vystřelením elektronového svazku na kovový cíl nebo „ohýbáním cesty“ elektronů pomocí magnetického pole je generováno THz záření.

Synchrotronové akumulární prstence jsou také velmi slibným zdrojem širokopásmového THz záření. Hlavním technickým nedostatkem pro generování THz pulzů během jednoho cyklu v akumulárním prstenci je stabilizování elektronového svazku. [2]

Shrnutí v bodech[16]:

Výhody:

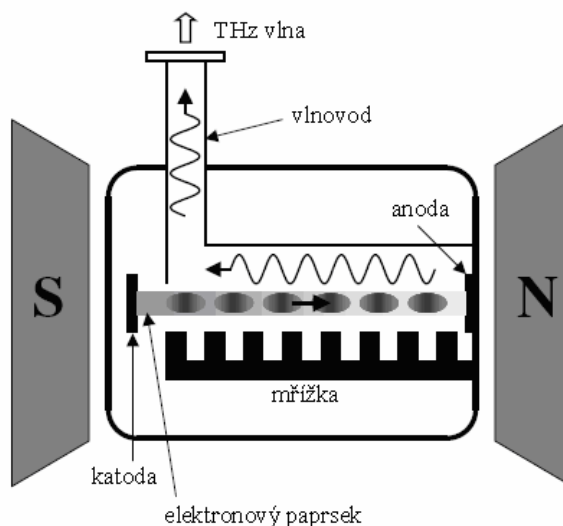
- vysoký výstupní výkon (od W po kW)
- širokopásmový signál

Nevýhody:

- rozměrný
- vysoká pořizovací cena

1.1.8 Oscilátor zpětné vlny

Oscilátor zpětné vlny (BWO), také nazývaný karcinotron je historicky jedním z nejstarších THz zdrojů (60.léta). Vytváří spojitou vlnu THz záření v rozsahu od 30 GHz do 1.4 THz. Je to laditelný zdroj relativně výkonného (až 300 mW při nízkých a 1 mW při vysokých frekvencích) a velmi monochromatického záření. [3]

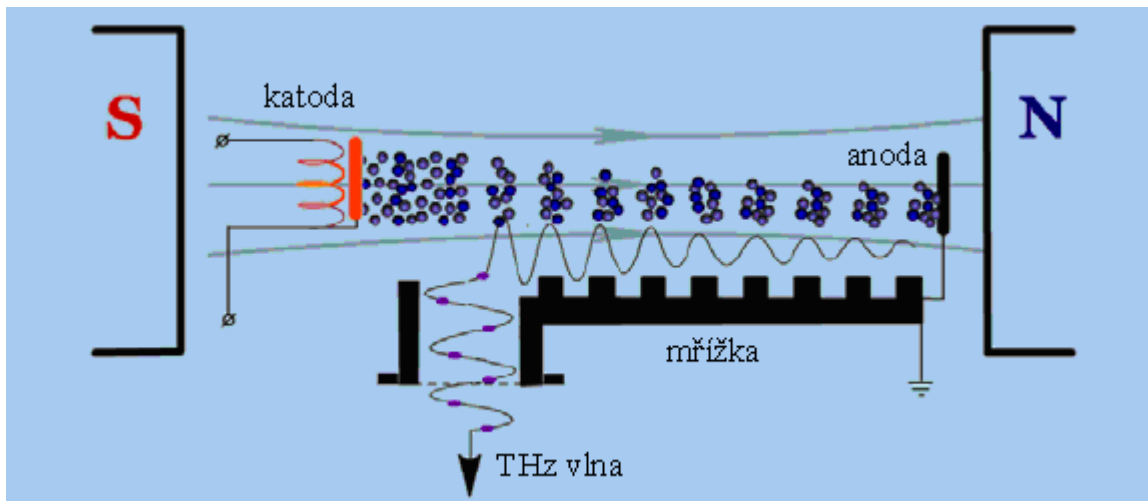


Obr. 20 Schéma konstrukce BWO [2]

Oscilátory zpětné vlny jsou elektronové vakuové trubice ve kterých elektronový paprsek reaguje spolu s elektromagnetickou vlnou. Elektrony jsou zpomaleny kovovou mřížkou ve tvaru hřebene a jejich kynetická energie je převedena na elektromagnetickou vlnu. Zařízení bylo pojmenováno BWO, protože elektronový paprsek a elektromagnetická vlna se vůči sobě pohybují v opačném směru.

Elektrony jsou vyzářeny z katody a urychleny stejnosměrným elektrickým polem mezi katodou a anodou. Permanentní magnety udržují směr elektronového paprsku. Opakující se mřížová struktura vyvolá prostorovou modulaci podélného elektrického pole, což zapříčiní energetickou modulaci v elektronovém paprsku. Periodické rušení seskupí elektrony do shluků. Šíření elektronů ve shlucích nabudí povrchové vlny na periodické struktuře. Jestliže rychlost elektronového paprsku odpovídá fázové rychlosti povrchové vlny, kynetická energie elektronů je koherentně převedena na elektromagnetickou vlnu, což znamená, že frekvence elektromagnetické vlny je dána rychlostí elektronů. Proto je frekvence laděna nastavováním napětí mezi elektrodami. Jelikož se skupinová rychlost povrchové vlny

pohybuje obráceně než fázová rychlost, energie převedená na pole je přenesena a zesílena v opačném směru. Záření vychází z vlnovodu připojeného na dutinu. [2]



Obr. 21 Schéma principu BWO [16]

Shrnutí v bodech[16]:

Výhody:

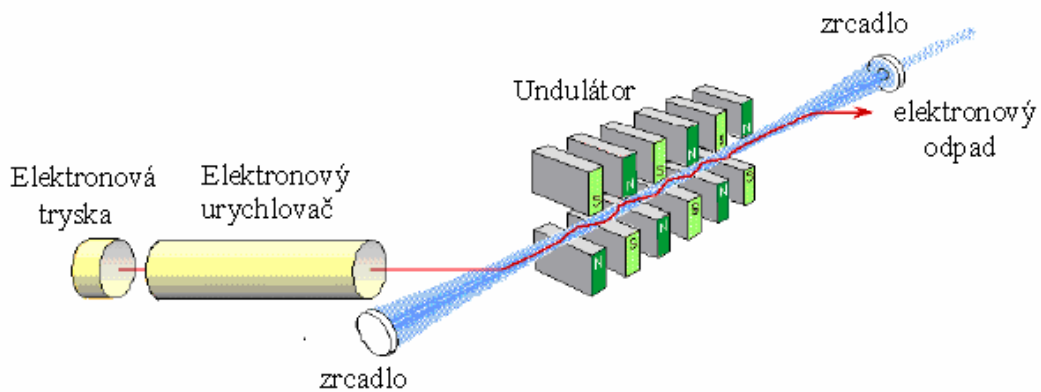
- nízké pořizovací náklady
- kompaktní
- laditelný
- monochromatický

Nevýhody:

- nízký výstupní výkon (od μW po mW)
- pouze pro nízké frekvence (pod 1 THz)

1.1.9 Free-electron laser (laser volných elektronů)

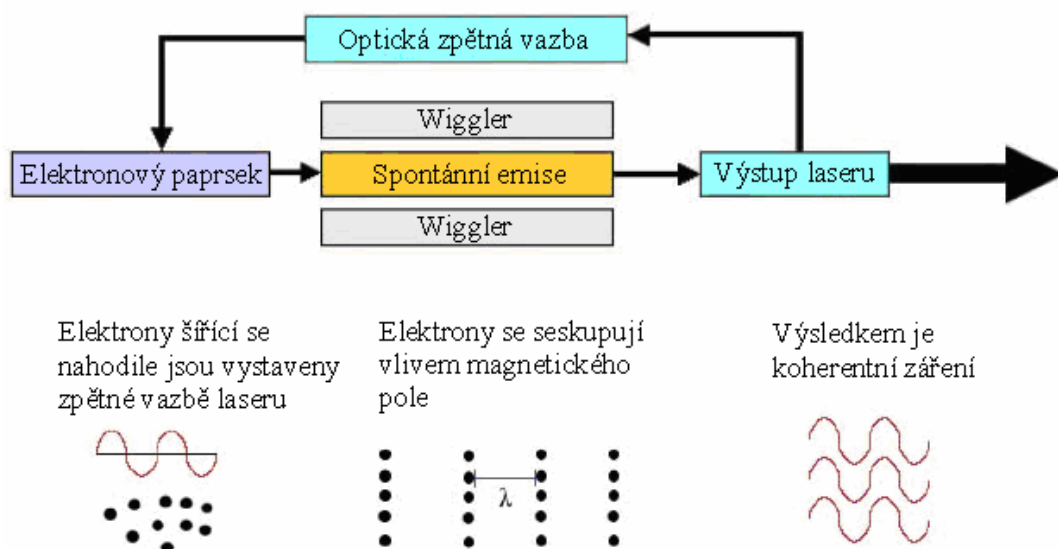
Free-electron laser (FEL) využívá relativistického elektronového paprsku procházejícího skrz wiggler – skupinu magnetů navrženou pro vytvoření periodického, příčného magnetického pole pro generování koherentního elektromagnetického záření. Periodicky se opakující magnetické pole zesiluje sinusoidní oscilaci elektronů, což vytvoří monochromatické záření.



Obr. 22 Princip FEL [16]

Zásadní vlastností FEL zařízení je široký rozsah výstupního spektra od mikrovln až po rentgenové záření. Jejich rozsáhlé a plynulé ladění je jedinečnou výhodou. Vlnová délka záření je dána nízkým počtem parametrů jako jsou hustota magnetů ve wiggleru, síla magnetického pole a energie elektronového paprsku. FEL zařízení mohou také vytvářet záření o velmi vysokém výkonu, protože se jich netýkají běžné potíže vysoce výkonných laserů jako jsou deformace optických zařízení vlivem tepla a únava materiálu.

V rezonátoru se šíří laserový paprsek dohromady s elektronovým paprskem, který je periodicky modulovaný magnetickým polem vytvořeným wigglerem.



Obr. 23 Blokové schéma principu FEL [15]

Vzájemným působením záření a pole wiggleru je elektronový paprsek seskupován, přičemž je modulační perioda závislá na vlnové délce laseru. Tento jev seskupování je zásadní pro vytvoření koherentně zesíleného záření. Vytvořením opakující se dráhy v resonátoru je laserový paprsek zesílen skrz synchronizaci mezi radiačním polem a elektronovou oscilací. [2]

Shrnutí v bodech[16]:

Výhody:

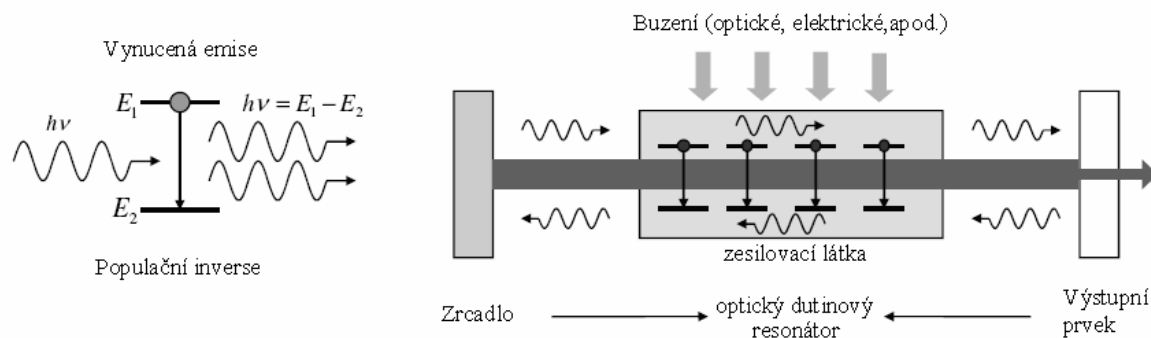
- široký rozsah ladění (celé THz spektrum z jediného zařízení)
- vysoce kvalitní prostorový a teplotní výstup
- vysoký průměrný a maximální výkon (v řádech desítek W až kW průměrného výkonu a až jednotky W v maximu)
- pulzní a spojitý signál

Nevýhody:

- relativně komplikovaný
- velmi vysoká pořizovací cena
- není plně přenosný, kvůli velikosti a potřebě zdrojů

1.1.10 Plynový laser

Základní kosntrukce THz plynových laserů je podobná jako u typických laserových systémů, jak je ukázáno na obrázku (Obr. 24). Důležitým komponentem navíc je vlnovod uvnitř dutiny v příčném směru použitý kvůli udržení modů laseru. Zesilovací látky THz plynových laserů jsou molekulární plyny jako CH_3F , CH_3OH , NH_3 a CH_2F_2 . THz záření pochází z rotačních přechodů molekul. Molekuly mají stálé dipólové momenty, proto jsou jejich rotační přechody přímo připojeny na elektromagnetické záření skrz působení dipólu.



Obr. 24 Schéma principu laseru, konstrukce [2]

Již bylo zkoumáno velké množství chemických látek pro vytváření THz záření pomocí plynových laserů a bylo získáno několik set laserových THz frekvencí. Tabulka (Tab 1) představuje seznam THz frekvencí s nejvyššími výkony. [2]

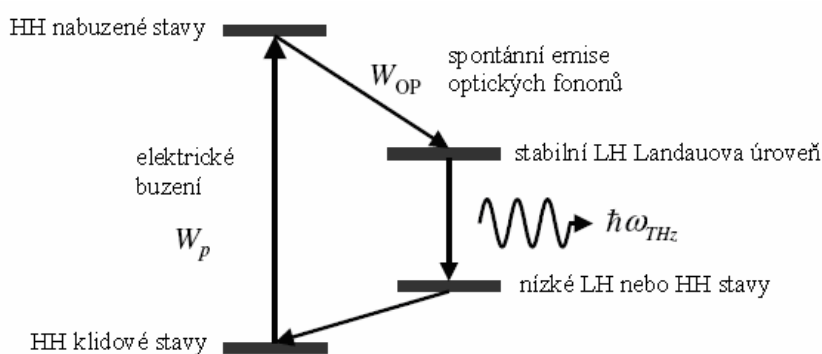
Tab 1 THz frekvence získané z plynového laseru [2]

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

1.1.11 P-tyt germaniový laser

P-tyt germaniové THz lasery jsou elektricky buzené polovodičové lasery. Obvyklou příměsí je prvek berylium, které poskytuje vysoké optické zesílení. Vyzařování laseru je založeno na pohybu proudu a populační inverzi horkých nosičů v P-tyt germaniových krystalech, které obklopuje zkřížené elektrické pole s magnetickým.

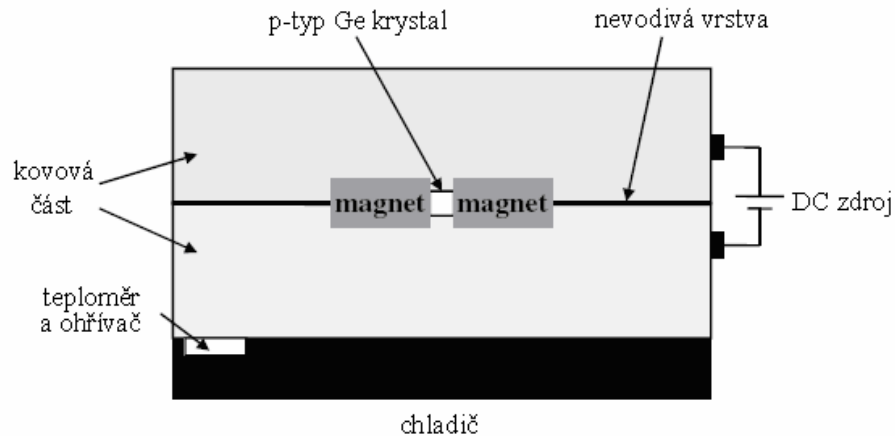
THz fotony jsou vytvořeny podněceným přechodem mezi dvěma děrami Landauových úrovní. Nabitá částice v magnetickém poli se pohybuje po kruhové dráze s cyklotronovou frekvencí odpovídající síle pole. Kvůli omezenému prostoru mohou úrovně kvantové mechanické energie nabitě částice nabít pouze diskretních hodnot. Diskrétní úrovně energie jsou nazývány Landauovy úrovně.



Obr. 25 Schéma energií populační inverze v p-tyt Ge [2]

Populační inverze je dovršena složitými přechody uvnitř pásma mezi stavy lehkých a těžkých děr při nízké teplotě (pod 40 K). V těchto kryogenních podmínkách převládající mechanismus rozptylování děr v p-tyt Ge je spontánní emise optických fononů. Pokud je aplikované elektrické pole dostatečně silné jsou díry volně zrychleny na energii optických fononů, což vytvoří přechod na nižší energetický stav vyzářením optického fononu. Tento jev je nazýván pohyb proudu. Určité množství těžkých děr (HH – heavy holes) se rozptýlí do pseudo-stabilních Landauových úrovní v pásmu lehkých děr (LH light-hole). Tyto pseudo-stabilní stavy jsou vytvořeny při zvláštních podmínkách zkříženého elektrického a magnetického pole. Akumulace proudění těžkých děr v pseudo-stabilním LH stavu zapříčiní

populační inverzi mezi stabilními Landauovými levely a levely s nižší energií. Obrázek (Obr. 25) představuje proces populační inverze v p-typ Ge krystalu, když jsou aplikovány zkřížené elektrické a magnetické pole.



Obr. 26 Konstrukce p-typ Ge THz laseru [2]

Chladicí pás, část uzavřeného okruhu chladicího systému udržuje krystal na kryogenné teplotě (pod 40K). Typická energie pulzu je několik μJ s opakováním pulzů po několika μs . Průměrný výstupní výkon vzrostl až na několik jednotek W. Frekvence je plynule laditelná od 1 do 4 THz měněním síly elektrického a magnetického pole. [2]

Shrnutí v bodech:

Výhody:

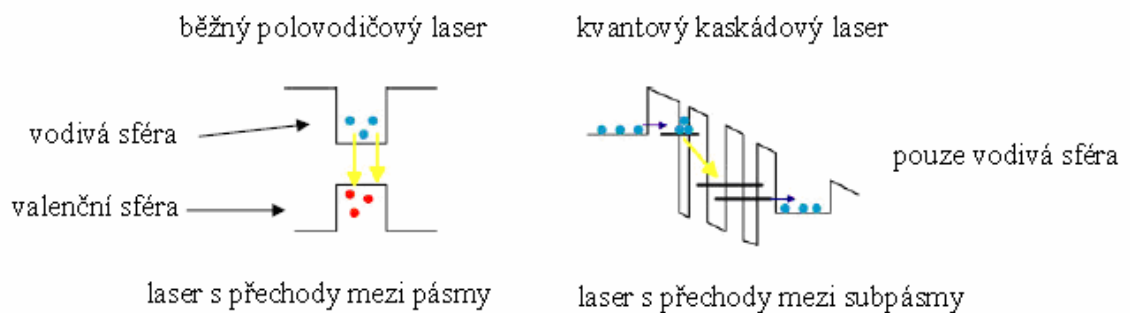
- rozsah ladění 1,5 až 4 THz
- vysoký výkon (W)

Nevýhody:

- nízká pracovní teplota (okolo 10K), vyžaduje kryogenné chlazení
- vyžaduje intenzivní elektrické a magnetické pole

1.1.12 Kvantové kaskádové lasery

Běžné polovodičové lasery nelze použít pro generování THz záření, protože energie jejich fotonů nedosahuje úrovně vodivé sféry polovodiče. Alternativním řešením je použití zařízení s kvantovým jevem v polovodičích pracujících na principu přechodu mezi subpásmy.

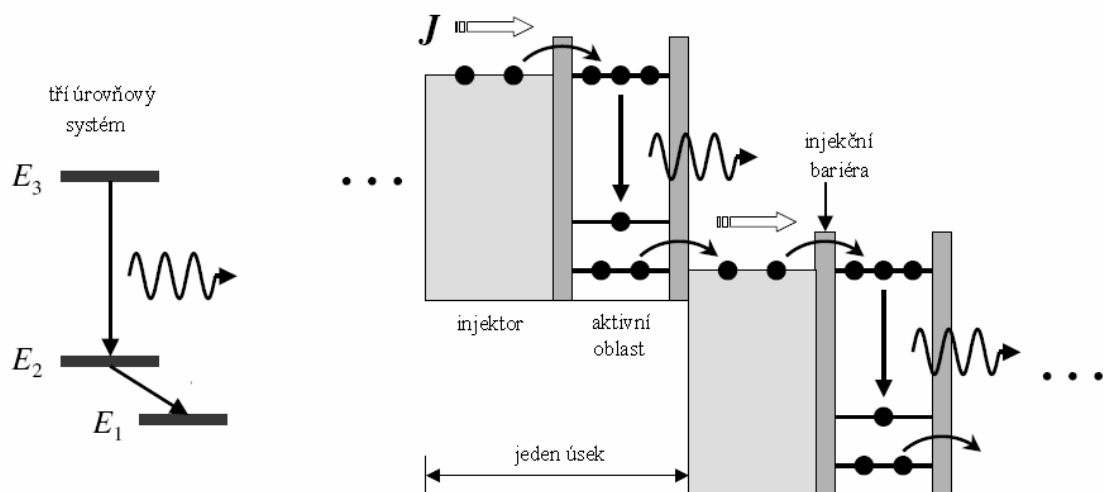


Obr. 27 Rozdíl mezi běžným a kvantovým kaskádovým laserem [15]

Kvantový kaskádový laser (QCL) je laser se strukturou různých typů polovodičů. Hetero-struktura tvoří mřížku periodicky se střídajících úrovní odlišných polovodičů. Vnější napětí vyvolá přechod mezi dvěma pseudo-odlišnými stavy v super-mřížce, což zapříčiní emisi THz záření.

Základními principy QCL jsou dva nepostradatelné procesy: přechod mezi sub-pásmy a kaskádování. Na rozdíl od emitující rekombinace párů elektronů a děr v běžných polovodičových laserech vyžadují přechody mezi sub-pásmy pouze elektrony – takže se jedná o unipolární proces. V QCL podstoupí elektron přechody mezi sub-pásmy v jednom úseku (úseky se opakují) super-mřížky, po té je elektron zaveden do dalšího úseku a podrobí se dalším sub-pásmovým přechodům. Tento proces se opakuje dokud elektron nedosáhne konce super-mřížky. Pojem kaskádování ukazuje na opakující se mnohonásobné přechody mezi sub-pásmy. Za pozoruhodné lze označit, že se kaskádového procesu netýká běžné omezení kvantové účinnosti, resp. jediný elektron může zapříčinit vytvoření mnoha fotonů.

Ve vývoji THz QCL jsou dvě hlavní omezení. První je energie jednoho THz fotonu – 4.1 meV je příliš nízká, protože může tepelné záření zamezit vytváření elektronu a co víc, také populační inverzi nezbytnou pro laserové vyzařování v QCL. Při teplotě kapalného helia dosahuje výstupní výkon QCL zařízení až 100mW, ale velmi rychle klesá s narůstající teplotou. V současnosti je nejvyšší pracovní teplota THz QCL okolo 180K. Druhé omezení spočívá v obtížnosti udržet mody laseru v malém rozsahu kvůli velké vlnové délce THz záření. Udržení modu je důležité, protože vynucená účinnost emise je úměrná k intenzitě světla v zesilujícím mediu. Dielektrické vlnovody běžných polovodičových laserů nemohou být použity pro THz QCL, protože hloubka pohlcení zanikajících vln je mnohem delší než velikost aktivních oblastí. Kovové vlnovody jsou nezbytnými komponenty THz QCL navzdory jejich velkým ztrátám.



Obr. 28 Schéma principu kvantového kaskádového laseru [2]

Jeden úsek struktury super-mřížky v QCL je složen z injektoru, injekční bariéry a aktivní oblasti. Přečody mezi sub-pásmy v aktivní oblasti zahrnují mnohanásobné kvantové propasti zapříčiní vznik záření. Činnost typického QCL laseru je založena na systému tří úroňňí. Populační inverze vzniká mezi úroňňemi 3 a 2. Struktura super-mřížky je vystavena napětí statického elektrického pole. Pro kaskádový proces je napětí nastaveno tak, aby úroveň 1 aktivní oblasti byla vyrovnaná s 3. úroňňí dalšího úseku struktury. Po té jsou použité elektrony z jedné aktivní oblasti zavedeny a znovu použity v dalším cyklu.

Rozsáhlá populační inverze je nezbytná pro efektivní činnost laseru. Proto je zásadní účinnost injektování do vyšších úrovní a rychlé vyprázdnění nižších úrovní. Stejně tak vynucená emise musí být dominantním procesem mezi dvěma vyzařovacími úrovněmi. [2]

Shrnutí v bodech[15]:

Výhody:

- kompaktní s potencionálně nízkou cenou
- účinnost (okolo 5%), jestliže jsou vyloučeny chladicí prvky
- možnost nastavení vlnové délky okolo 3 THz
- průměrný výkon

Nevýhody:

- omezený rozsah ladění s jedním zařízením, i když mohou být zařízení vyráběny na míru
- kryogenická pracovní teplota (pro výstupní výkon v mW je teplota nižší než 50 K)
- žádná účinná metoda pro zvýšení účinnosti

1.2 Terahertzové detektory

Detekční THz metody jsou převážně členěny na koherentní a inkoherentní technologie. Základní rozdíl spočívá v tom, že koherentní detekce využívá měření amplitudy a fáze pole, zatímco inkoherentní detekce využívá měření intenzity. Metody koherentní detekce jsou ve své základní podstatě úzce spojeny s technikami generování a to včetně klíčových prvků systému. Zvláště optické metody využívají stejné světelné zdroje pro generování a detekování.

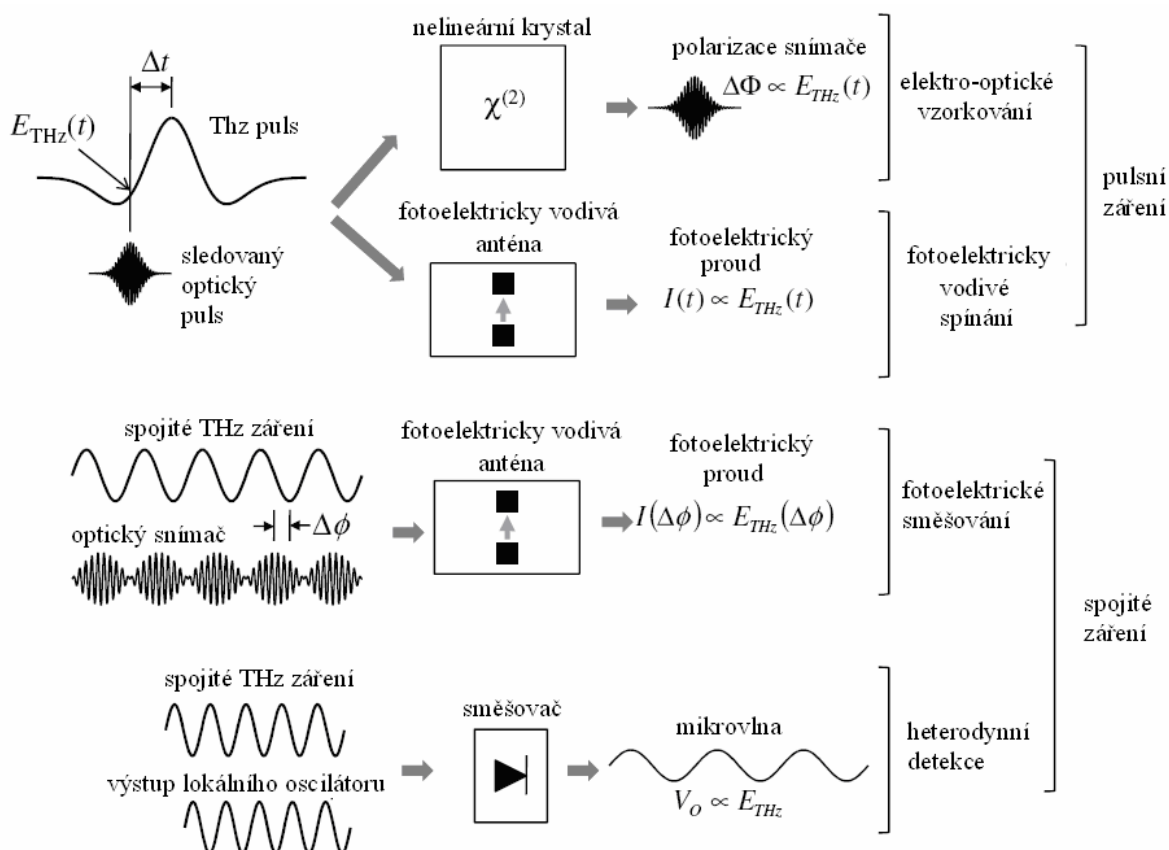
1.2.1 Koherentní detektory

Obrázek (Obr. 29) zobrazuje běžně používané metody koherentní detekce. Elektrooptické (EO) vzorkování ve volném prostoru měří stávající elektrické pole širokopásmových THz pulzů v určitém čase daném Pockelsovým jevem, který úzce souvisí

s optickou rektifikací. V nelineárním optickém krystalu THz pole vytváří dvojlom, který je úměrný poli amplitudy. Celá vlna je dána měřením, pomocí slabého optického snímacího signálu, polem navozeného dvojlomu jako funkce relativního zpoždění mezi THz a optickými pulzy.

Snímání s PC anténou také měří širokopásmové THz pulzy v určitém čase. Za absence napětového pole vyvolá THz pole proud ve foto-elektricky vodivé mezeře tehdy, když snímací optické pulzy vytvoří fotoelektrické nosiče. Indukovaný fotoelektrický proud je úměrný k amplitudě THz pole. Zatímco dochází ke změnám časové prodlevy mezi THz pulzem a snímacím optickým zářením je zaznamenán tvar THz pulzu v určitém čase měřením fotoelektrického proudu.

Kombinované nastavení širokopásmového THz generování a detekování měří změny amplitudy a fáze THz pulzů vyvolané vzorky, které poskytují dostatečnou informaci pro současné stanovení absorpce a rozptylu vzorku. Tato metoda se nazývá časově rozlišená spektroskopie nebo zkráceně THz-TDS.



Obr. 29 Přehled metod koherentní THz detekce [2]

Fotoelektrické směšování měří spojité THz záření pomocí fotoelektricky vodivého spínání. V tomto případě fotoelektrický proud představuje závislost sinusoidy na relativní fázi mezi záznejší optických signálů a THz zářením.

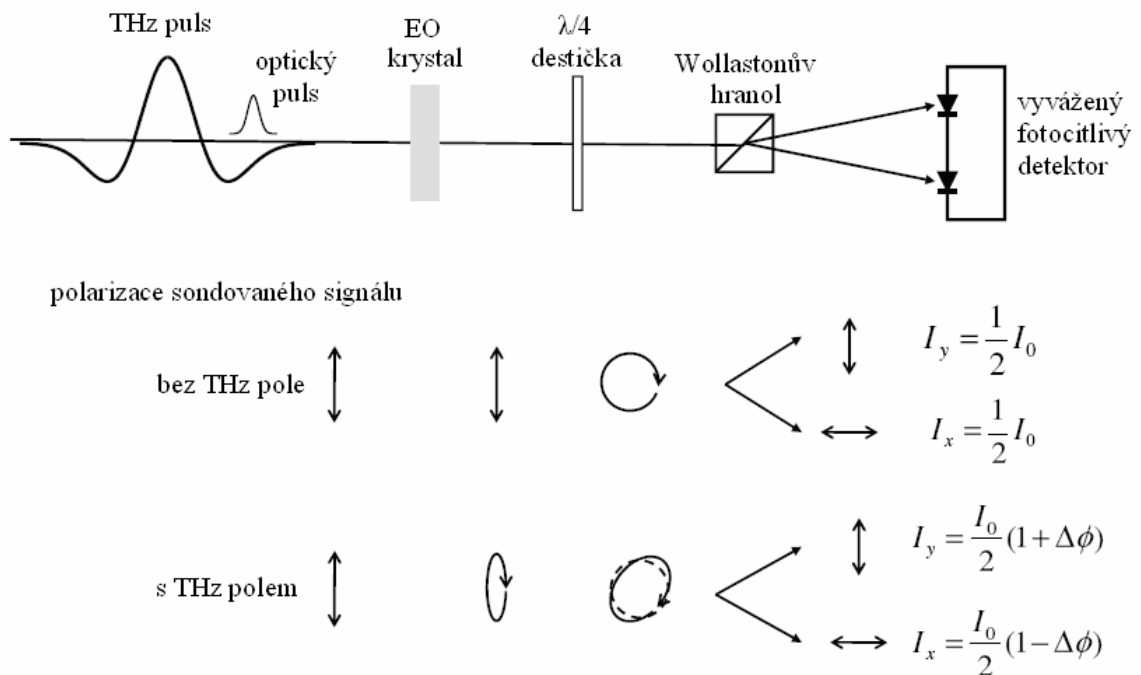
Heterodynní detekce využívá nelineárního zařízení nazývaného směšovač. Nejběžněji používanými směšovači jsou Schottkyho diody. Klíčový proces ve směšovači je frekvenční sestupná konverze, která je uskutečněna směšováním THz signálu f_{THz} s referenčním zářením o konstantní frekvenci. Směšovač vytváří výstupní signál o rozdílové frekvenci nazývané střední frekvence, $f_{\text{ST}} = f_{\text{THz}} - f_{\text{R}}$. Amplituda výstupního signálu je úměrná THz amplitudě. Na rozdíl od optických metod je heterodynní detekce obvykle používána pro detekování nekoherentního záření.

Běžně používanými inkoherentními detektory jsou tepelné snímače jako jsou bolometry, Golay buňky a pyroelektrické zařízení. Běžným prvkem všech tepelných detektorů je pohlcovač záření připojený na chladič. Energie záření je zaznamenávána teploměrem měřícím teplotní nárůst v pohlcovači. Jeden typ tepelného detektoru je významný svým specifickým způsobem měření teplotního nárůstu. Bolometry jsou opatřeny elektrickým odporovým teploměrem vyrobeným z těžce dopovaného polovodiče jako je Si nebo Ge. Obecně bolometry pracují při kryogenické teplotě. Pyroelektrické detektory využívají pyroelektrického materiálu, který přeměňuje teplotu na elektrickou polarizaci. V Golay buňce je zahřívání převedeno na malé množství plynu v utěsněné komoře za pohlcovačem. Měřič optické odrazivosti detekuje deformaci membrány vyvolanou nárůstem tlaku. Tyto tepelné detektory reagují na záření ve velmi širokém spektrálním rozsahu. Protože pohlcovač záření musí dosáhnout teplotní rovnováhy pro měření teploty, detekční odezva je relativně pomalá v porovnání s typickým detektory světla. [2]

1.2.1.1 Elektro-optické vzorkování ve volném prostoru

Stejně jako u detektoru THz záření využívajícího fotoelektricky vodivé antény měří elektro-optické (EO) vzorkování ve volném prostoru stávající elektrické pole THz pulzů v časové oblasti, určené nejen amplitudou, ale také fází s vysokou přesností. Základním principem EO vzorkování je Pockelsův efekt v elektro-optických krystalech. Pockelsův

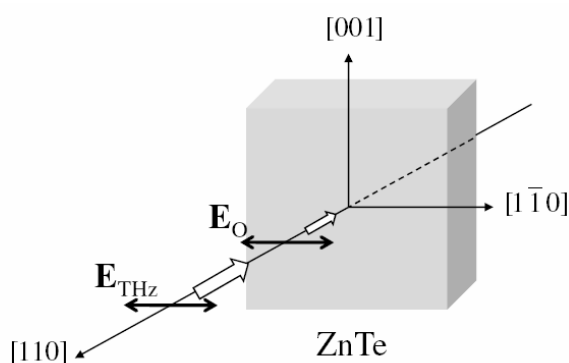
efekt úzce souvisí s optickou rektifikací, což je zjevné v podobnosti mezi nelinearitami polarizace druhého řádu. V bezetrátových materiálech má Pockelsův efekt stejné koeficienty optických nelinearit jako optická rektifikace. Statické elektrické pole přivodí v nelineárním optickém materiálu dvojnásobně úměrně k amplitudě pole.



Obr. 30 Schéma elektro-optického vzorkování ve volném prostoru [2]

Na obrázku (Obr. 30) je zobrazeno typické schéma EO vzorkování ve volném prostoru pro měření dvojnásobně navozeného elektrickým polem. Ideálně rychlost skupiny optických pulzů odpovídá THz fázové rychlosti v EO krystalu, pak je během šíření optický pulz ovlivněn konstantním elektrickým polem THz pulzu. Ve spodní části obrázku je ukázán vývoj polarizace sondovaného pulzu v několika krocích polarizace s nebo bez THz pole. Zatímco lineárně polarizovaný optický pulz a THz pulz se šíří skrz EO krystal, elektrickým polem navozený dvojnásobně vytváří slabou eliptickou polarizaci sondovaného pulzu. Polarizace sondovaného pulzu se vyvíjí v převážně kruhově, ale po průchodu přes $\lambda/4$ destičku elipticky. Wollastonův hranol rozštěpí snímaný paprsek na dvě kolmé složky, které vyše na vyvážený detektor. Detektor měří rozdíl intenzity mezi dvěmi kolmými složkami pozorovaného pulzu, který je úměrný k amplitudě THz pole.

Pro účinné EO vzorkování jsou také žádoucí vlastnosti ZnTe pro THz generování (vyrovnání rychlosti blízko 800nm, vysoká průhlednost optických a THz frekvencí a velký EO koeficient). Typický návrh optické a THz polarizace pro EO vzorkování je zobrazen na obrázku (Obr. 31). Elektrickým polem vyvolaný dvojlom je maximalizován pokud je THz elektrické pole a optická polarizace paralelní k $[1\bar{1}0]$ osám $\langle 110 \rangle$ orientovaného krystalu.



Obr. 31 ZnTe $\langle 110 \rangle$ orientovaný krystal [2]

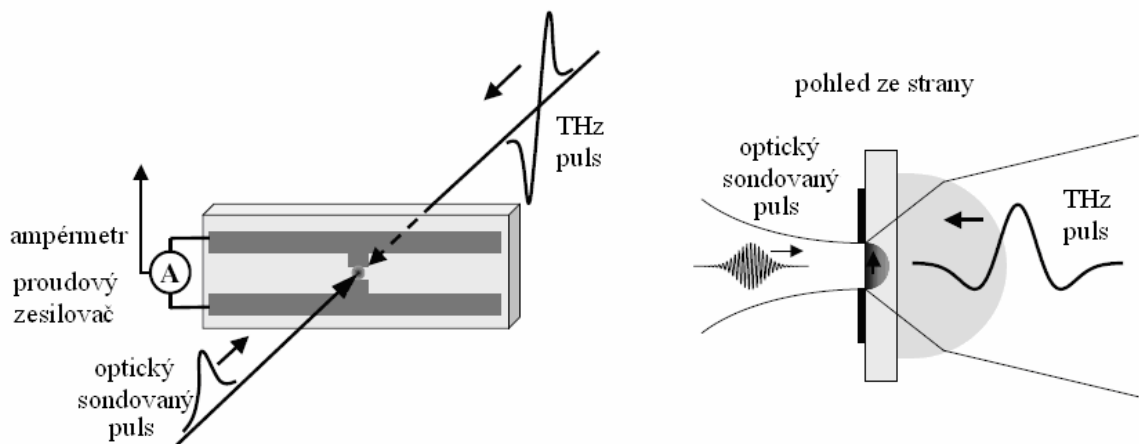
Nelineární polarizace při optické frekvenci je kolmá na příslušné optické pole, které naznačuje, že lineární polarizace optického snímaného signálu se vyvíjí v eliptické polarizaci skrz šíření v ZnTe pod vlivem THz pole.

V praxi je teplotní nebo spektrální rozlišení EO vzorkování omezené třemi faktory: konečnou hustotou pulzů sledovaného optického signálu, rozptylem nelineární susceptibility a záměnou mezi skupinou optických pulzů a THz fázovou rychlostí.

1.2.1.2 Foto-elektricky vodivá anténa

Základní princip detekce THz pole v PC anténě je převážně shodný s THz generováním v PC zářiči. Obrázek (Obr. 32) zobrazuje konstrukci časově rozlišeného měření THz elektrických polí s PC přijímačem. Při absenci napětového pole indikuje THz pole proud ve fotoelektricky vodivé mezeře, za podmínky, že jsou zde přivedeny fotoelektrické nosiče optického snímaného pulzu. Fotoelektrický proud trvá tak dlouho jak

je velká životnost nosiče, která by měla být menší než hustota THz pulzů pro časově rozlišené měření tvaru vlny. Vyvolaný fotoelektrický proud je úměrný k velikosti amplitudy pole THz záření zaměřeného na fotoelektricky vodivou mezeru. Tvar THz pulzu je snímán v časové závislosti měřením proudu zatímco se mění zpoždění mezi THz pulzem a snímaným optickým pulzem. Typický fotoelektrický proud je v řádech nA, proto je pro měření nezbytný proudový zesilovač. V případě zvětšení odstupů mezi signálem a šumem je signál zpracováván synchronním zesilovačem s modulátorem optické intenzity jako je přerušovač optického paprsku (optical chopper).

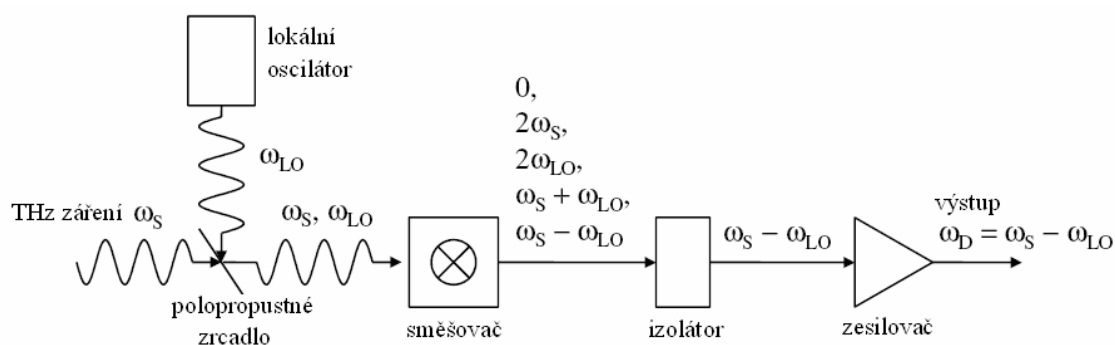


Obr. 32 PC anténní přijmač [2]

PC přijímač má určitá frekvenční omezení. Velikost bodu THz paprsku zaměřeného na detektor závisí na frekvenci kvůli rozptylu paprsku. Z toho vyplývá, že čím je nižší frekvence, tím je slabší intenzita pole na detektoru. Při nízkých frekvencích je funkce rozptylu úměrná frekvenci. [2]

1.2.1.3 Heterodynní detekce

Heterodynní detekce je založená na frekvenční sestupné konverzi v nelineárním zařízení dosáhnuté směřováním signálu s referenčním zářením o konstantní frekvenci. Základní princip této metody je analogický k fotoelektrickému směřování a generování pomocí rozdílové frekvence. Předpokládáme že nelineární zařízení (neboli „směšovač“) je charakterizovaný kvadratickou nelinearitou. Pro signální a referenční záření obsahuje výstupní signál pět frekvenčních komponent.



Obr. 33 Schéma heterodynního detektoru [2]

Obrázek (Obr. 33) zobrazuje cestu signálu typického heterodynního detektoru. Jedním z klíčových komponentů je lokální oscilátor (LO), který poskytuje referenční záření. V určování celkového výkonu detektoru hraje výkon výstupu LO rozhodující roli. V oblasti 0.1 až 1 THz jsou běžně používány polovodičové zářiče jako LO a v oblasti okolo 1 THz jsou to plynové lasery. Slibné THz LO pro budoucí aplikace jsou kvantové kaskádové lasery kvůli jejich kompaktnosti a vysokému výkonu. Výhodou heterodynních detektorů je, že spektrum světla může být rozlišeno snímáním LO výstupní frekvence a měřením signálu spektrálním analyzátozem. Se spektrálním rozlišením, převážně daným LO šířkou spektrální čáry, může být měřeno celé spektrum, pokud je šířka pásma záření v rozsahu ladění LO.

Další klíčový komponent heterodynní detekce je směšovač s nelineární charakteristikou. Ve spektrálním rozsahu pod 1 THz jsou obvykle jako směšovače použity Schottkyho diody. Schottkyho směšovače mají poměrně nízkou citlivost a vyžadují LO

s malým výkonem (mW). Nejcitlivější směšovače okolo 1 THz jsou kryogenické detektory stejně jako elektronové bolometry. Elektronové bolometry vyžadují velmi nízký výkon (okolo 10nW) LO díky jejich vysoké citlivosti. Běžně používaný elektronový bolometr je indium antimonit (InSb) detektor. Niobium (Nb) a niobium nitrid (NbN) v supravodivé fázi jsou častěji využívány jako detekční materiály pro elektronové bolometry. Pro dosažení velké detekční šíře spektra musí být malý čas tepelné relaxace. Bolometry s Nb a NbN využívají rozdílných chladících prostředků. Tenký film NbN je typický velmi krátkým časem tepelné relaxace (pod 10 ps), takže NbN bolometr využívá vnitřního fononového chlazení. Pokud je čas tepelné relaxace Nb příliš velký, Nb bolometry využívají velmi krátký a tenký Nb proužek pro usnadnění difúzního chlazení. Pro oba supravodivé bolometry klesá čas teplotní relaxace na několik desítek piko-sekund. Detekční šířka pásma supravodivých elektronových bolometrů je v rozsahu několika gigahertz. [2]

1.2.2 Teplotní detektory

Pro snímání spojitého THz záření jsou běžně používány teplotní detektory, mezi které patří bolometry, Golayovi články a pyroelektrické prvky. Základním prvkem teplotních detektorů je pohlcovač záření připojený k chladiči. Energie záření absorbovaná pohlcovačem je přeměněna na teplo, které vytvoří teplotní nárůst, jež je měřen teploměrem. Vzhledem k nízké tepelné kapacitě pohlcovače v něm teplo způsobuje ostré teplotní změny. Jeden z tepelných detektorů je významný specifickým způsobem, který používá pro měření rozdílů teploty mezi pohlcovačem a chladičem. Energie záření pohlcovače je odečtena měřením výstupu.

Následně bude stručně popsán princip nejčastěji používaných teplotních detektorů. Bolometry jsou vybaveny elektrickým odporovým teploměrem pro měření teploty pohlcovače záření. Obvykle je teploměr vyrobený ze silně dopovaného polovodiče jako je Si nebo Ge, kde je využito skutečnosti, že elektrický odpor těchto materiálů je citlivý na teplotu. Bolometr je kryogenický detektor, který pro vysokou detekční citlivost pracuje při nižší a nebo stejné teplotě, jako má tekuté helium. Pyroelektrický detektor využívá pyroelektrického materiálu, ve kterém teplota způsobuje změny ve spontánní elektrické

polarizaci, čímž mění konstantu dielektrika. Klíčovým prvkem tohoto typu detektoru je kondenzátor obsahující pyroelektrický materiál. Změna teploty detektoru způsobí přeskočení elektrického náboje mezi elektrodami. Teplotní změna je dána měřeným tokem proudu, který vzniká pro vyrovnání vzniklého napětí na kondenzátoru. Pohlcovač záření Golayova článku je tvořen počerněným tenkým filmem naneseném na substrátu. Teplo je převedeno na malé množství plynu v uzavřené komoře za pohlcovačem, což zapříčiní vzrůst tlaku v komoře. Na zadní straně komory je připojena odrazivá a pružná membrána. Měření optického odrazu detekuje deformace membrány, které jsou vyvolány nárůstem tlaku v komoře.

Oblíbenou vlastností teplotních detektorů je, že reagují na záření velké šíří spektra, čehož nelze dosáhnout s většinou fotonových detektorů. Na druhé straně jsou teplotní detektory velmi pomalé ve srovnání s typickými fotonovými detektory, protože před měřením záření musí pohlcovač dosáhnout teplotní rovnováhy. Čas (konstanta) pro jedno měření typickým bolometrem je okolo 0.1 ms při teplotě kapalného helia. Golayovi články a pyroelektrické detektory pracují s konstantou 1s při běžné teplotě okolí.

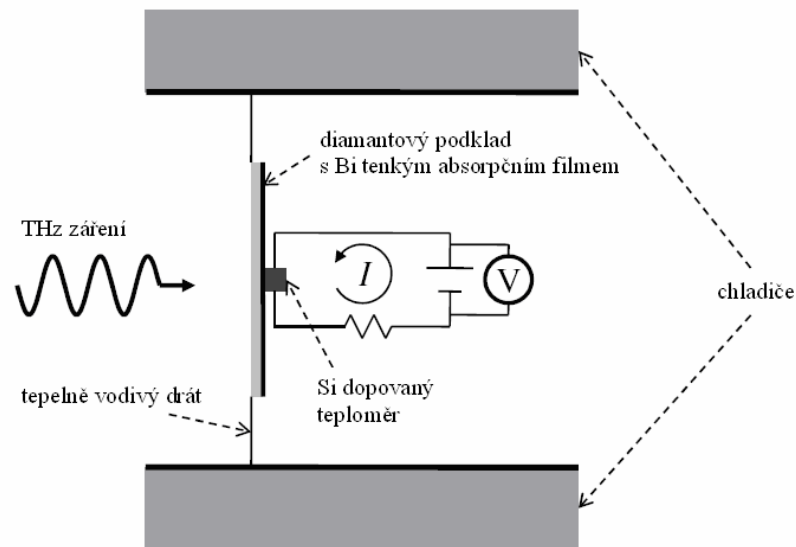
Kvůli silnému vlivu okolní teploty vyžaduje detekce THz záření speciální opatření kompenzující vlivy prostředí. Běžný a přesto výkonný způsob je rozlišení požadovaného THz záření od pozadí signálu, čehož se dá dosáhnout modulováním intenzity patřičného THz paprsku a měření postupných změn ve výstupním signálu. [2]

1.2.2.1 Bolometry

Bolometr je teplotní detektor, který využívá materiálu, jehož elektrická resistance je citlivá na teplotní změny. V případě potřeby dosáhnout vysoké citlivosti bolometru je nutné pracovat při teplotě rovné či nižší teplotě tekutého helia. Zatímco bolometr může měřit výkon záření přes celou šíří spektra od THz po rentgenové záření, je tato metoda detekování velmi důležitá pro měření THz vln, protože je v THz spektru jedna z nejcitlivějších.

Pokud má bolometr oddělené komponenty pro klíčové operace, zařízení je nazýváno složený bolometr. Některé sestavy bolometrů využívají komponenty vykonávající více

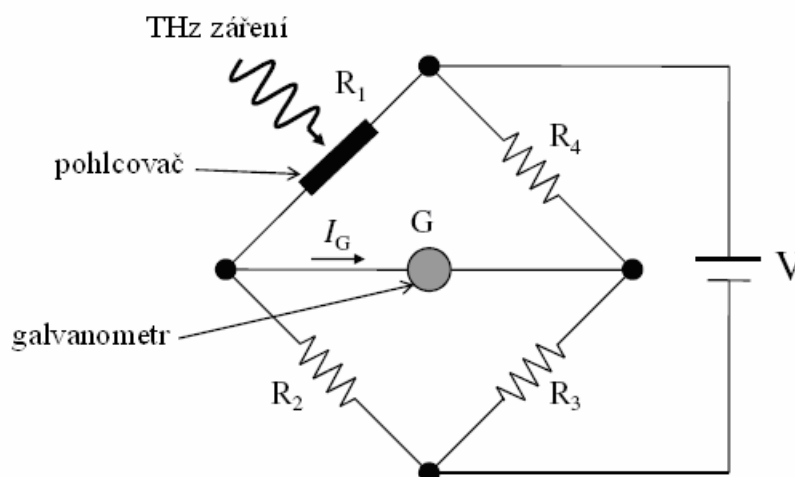
funkcí. Nicméně obecně jsou složené bolometry výkonnější, protože každá funkce bolometru může být nastavena nezávisle na ostatních. Obrázek (Obr. 34) ukazuje klíčové komponenty a jejich pracovní nastavení typického složeného bolometru.



Obr. 34 Schéma bolometru [2]

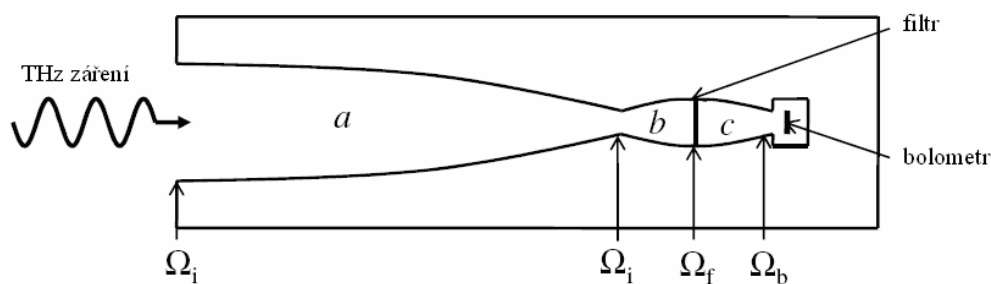
Zařízení sestává z pohlcovače záření uloženém na substrátu a teploměru, který zaznamenává změny elektrické resistance vzniklé změnou teploty substrátu. Substrát je připojen na chladič tepelně vodivými dráty. Chladič obsahuje Dewarovu nádobu naplněnou tekutým heliem pro udržení detektoru na kryogennické teplotě. Pohlcená energie záření pohlcovačem je přeměněna na teplo, které zvedne teplotu pohlcovače a současně teploměru. Vzrůstající teplota způsobí změnu v resistenci teploměru, která je detekována měřením změny elektrického signálu procházejícím skrz.

Obrázek (Obr. 35) představuje jednoduchý obvod pro měření teplem indikovaného proudu. Pohlcovač záření plní funkci jednoho z rezistorů vyváženého Wheatsonova můstku. Když záření způsobí změnu v resistenci pohlcovače, můstek se dostane do nerovnováhy a skrz galvanometr proteče proud. Některé bolometry obsahují navíc vyrovnávací pohlcovač na protější straně můstku. Tento vyrovnávací pohlcovač udržuje rovnováhu můstku tím, že kompenzuje vlivy vnějšího záření.



Obr. 35 Zapojení bolometru do Wheatsonova můstku [2]

Kvalitní pohlcovač záření musí mít téměř stejnou odezvu přes celé spektrum s nízkou odrazivostí a vysokou schopností pohlcovat. Nepostradatelnou vlastností je také nízká tepelná kapacita. Rozhodující jsou tepelné vlastnosti substrátu: vhodná je vysoká tepelná vodivost a nízká tepelná kapacita substrátu. Typický vysoce účinný pohlcovač a současně substrát obsahuje tenký kovový film nanesený na tenkém nevodivém substrátu. Široce používaný materiál pro pohlcovač je Bi, kvůli jeho relativně nízké vodivosti, vysoké schopnosti absorbovat záření a velmi nízké tepelné kapacitě. Nízká vodivost je užitečná, protože je z praktických důvodů pro účinnou absorpci Bi film tenký, takže je jednoduché udržet jednotnou tloušťku filmu. Diamant je považován za nejlepší materiál pro substrát kvůli jeho skvělé tepelné vodivosti a vysoké průchodnosti THz záření pod 30 THz. Safir má také velmi dobrou tepelnou vodivost a průchodnost pod 10 THz. Teploměr je tepelně připojen na pohlcovač a tím současně substrát. Nízká tepelná kapacita a elektrický šum jsou upřednostňované vlastnosti. Reakce elektrické rezistence na změnu teploty musí být stálá a úměrná pro určité požadované pracovní podmínky. Silně dopované Si nebo Ge jsou nejčastěji užívané materiály pro teploměry. Dopováním se materiál přibližuje svými vlastnostmi přechodu mezi kovem a izolantem s většinou příměsí a kompenzující menšinou příměsí. Po té elektrická rezistence není pouze dostatečně nízká při kryogenické teplotě, ale také citlivá na okamžité změny teploty.



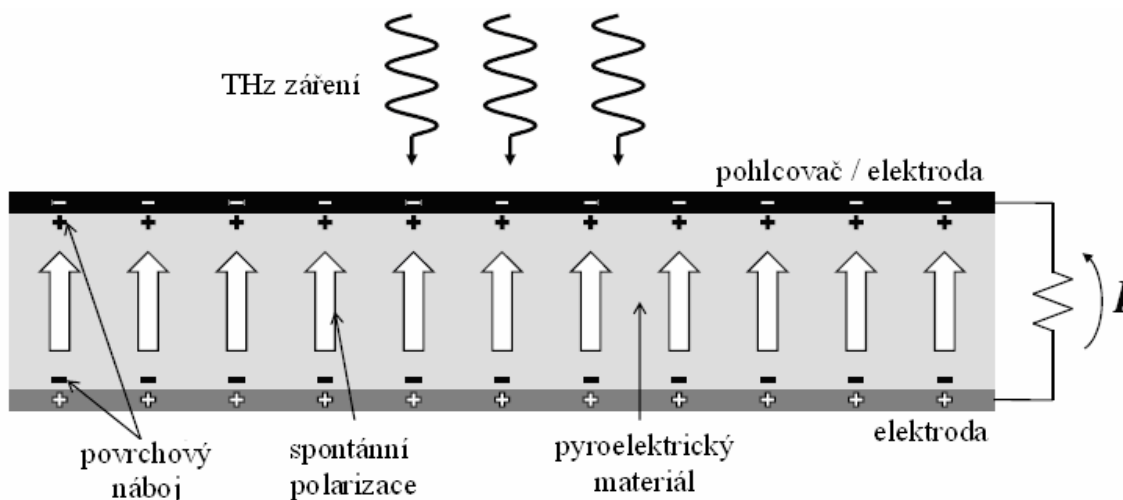
Obr. 36 Vlnovod s Winstonovými koncentrátory [2]

V případě potřeby zvětšení citlivosti detekce je nutné zmenšit plochu pohlcovače. Ve volném prostoru je těžké zaostřit patřičný THz paprsek na malý bod, protože jeho relativně velká vlnová délka je srovnatelná s velikostí pohlcovače. Většina bolometrů využívá mnoha vidový vlnovod pro zlepšení přívodu patřičných THz vln. Winstonův koncentrátor světla je široce používán kvůli jeho maximálnímu prostorovému úhlu. Na obrázku (Obr. 36) je vidět struktura vlnovodu, ve které je začleněna skupina Winstonových koncentrátů: úhel „a“ se využívá pro příjem vstupu a odfiltrování pozadí, úhel „b“ se využívá pro zvětšení účinnosti filtrování a úhel „c“ pro srovnání osy paprsku s osou pohlcovače. [2]

1.2.2.2 Pyroelektrické detektory

Pyroelektrický krystal je spontánně polarizovaný tím, že každá elementární část krystalu má permanentní elektrický dipólový moment ve směru se specifickými osami krystalu. Spontánní polarizace je základní vlastností mnoha krystalických tříd. Deset z 32 krystalových tříd jsou pyroelektrické. Jestliže vnější elektrické pole může převrátit póly, materiálu se říká ferroelektrický. Všechny ferroelektrické materiály jsou pyroelektrické, ale ne naopak. Spontánní elektrická polarizace v pyroelektrickém materiálu je citlivá na změny teploty a tento fyzikální jev se jmenuje pyroelektricitá.

Běžně používané materiály pro pyroelektrické detektory jsou triglycyrin sulfát (TGS), druhotný triglycyrin sulfát (DTGS), lithium tantalát (LiTaO_3) a barium titanát (BaTiO_3). V porovnání s ostatními pyroelektrickými detektory mají TGS a DTGS detektory poměrně vysokou citlivost při THz frekvencích.



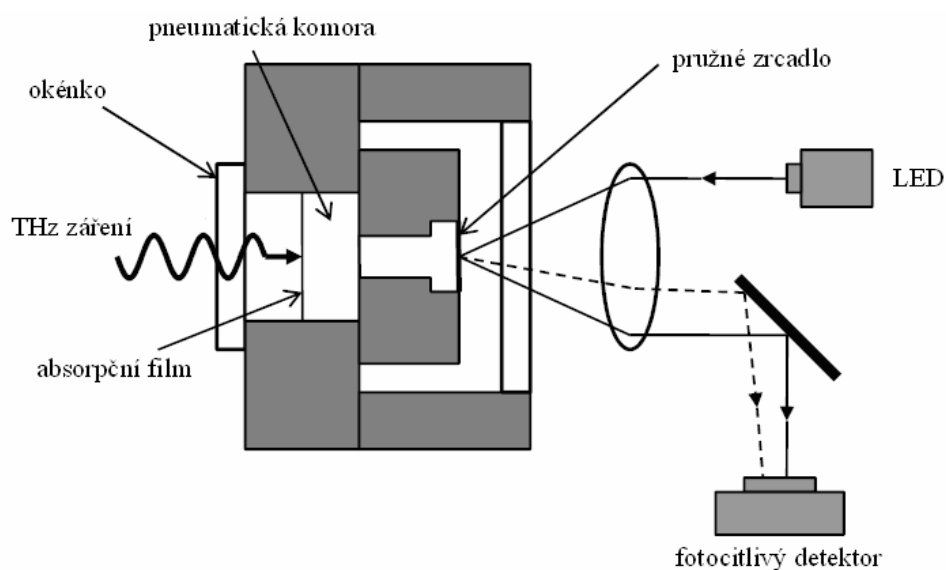
Obr. 37 Struktura pyroelektrického detektoru [2]

Spontánní polarizace je doprovázena výskytem nábojů na povrchu, které jsou neutralizovány volnými nosiči tvořícími stabilní stav. Na rozdíl od tyčového magnetu, kus pyroelektrického materiálu běžně nevykazuje makroskopický dvou pól kvůli vyvažování nábojů. Nicméně vyvažování nábojů je klíčovým procesem pro detekování THz záření. Obrázek (Obr. 37) ukazuje základní strukturu pyroelektrického detektoru. Řez pyroelektrického krystalu kolmý na jeho polarizační osy je vložen mezi dvě elektrody. Ty nejlepší jsou navíc načerněny pro větší pohlcování záření. Pokud je elektroda průhledná v požadované oblasti spektra, povrch krystalu je určený k pohlcení patřičného záření. Teplo vytvořené patřičným zářením zvedá teplotu pyroelektrického krystalu. Nárůst teploty způsobí pokles spontánní polarizace a současně povrchových nábojů. Elektrody připojené ke dvěma protějším povrchům krystalu tvoří kapacitu (kondenzátor). Jestliže je obvod uzavřen, protéká skrz něj proud kvůli vyrovnání změn v nábojích povrchu. Obvody ve skutečných detektorech jsou mírně komplikovanější: pyroelektrický kondenzátor plní funkci napěťového a proudového zdroje. [2]

1.2.2.3 Golayovi články

Golayův článek je pneumatický detektor záření pro široké spektrum záření od milimetrových vln až po blízké IR vlny. Při THz frekvencích může rozpoznat záření o úrovni energie $10 \mu\text{W}$ a menší. Obrázek (Obr. 38) představuje základní části a princip činnosti typického Golay článku. Modulované THz záření prochází skrz přední okénko a je pohlceno absorpčním filmem. Pohlcená energie zahřívá malé množství plynu uzavřené v pneumatické komoře, což vyvolá tepelnou expanzi plynu. Výsledný tlak vyvolá deformace pružného zrcadla připojeného na zadní straně komory. Na pružné zrcadlo je zaměřen optický paprsek z LED. Odražený paprsek je odebírán a zaměřen na fotoelektrický detektor. Odchylka zapříčiněná deformací membrány je rozpoznána výstupním detekčním systémem.

Vysoká detekční citlivost Golayova článku vyžaduje několik podmínek na své komponenty. Ideálně by měl být absorpční film pouze látka vykazující změny tepla. Pro docílení tohoto musí být materiály pro okénko a pneumatickou membránu tepelné izolanty vysoké kvality a plynem by mělo procházet záření celého detekčního spektra. Tepelná vodivost plynu by měla být nízká. Běžně používaný plyn je xenon, protože je to jeden z nejméně vodivých dostupných plynů.



Obr. 38 Schéma Golayova článku [2]

Mezi teplotními detektory záření je Golayův článek nejcitlivější detektor, který pracuje při pokojové teplotě. Pokud je modulační frekvence několik desítek hertzů je odezva Golayova článku v rozmezí kV/W. Není překvapením, že původní konstrukce doznala pouze malých změn od doby před 60 lety, kdy byl vyvinut první Golayův článek. Nicméně nevýhodou starého návrhu byla rozměrnost článku. Několik pokusů o překonání tohoto omezení dosáhlo výsledků v podobě několika miniaturizovaných Golayových článků vyrobených za pomoci mikrotechnologií. [2]

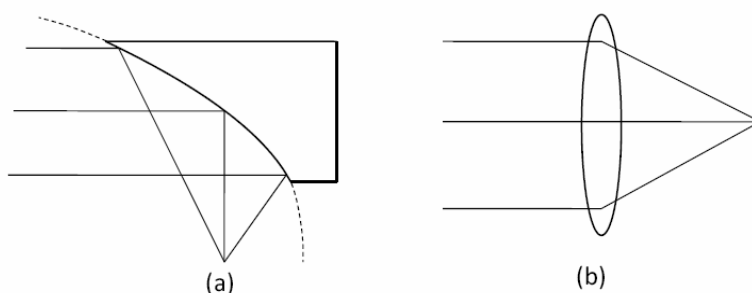
1.3 Terahertzová optika

1.3.1 Zrcadla a čočky

Pro zaostření a kolimaci THz paprsků se široce používají mimoosé parabolické zrcadla. Povrch mimoosého zrcadla ve tvaru odříznuté části z paraboloidu (Obr. 39) je obvykle pokryt běžnými kovy jako jsou hliník nebo zlato, jejichž odrazivost v THz oblasti je blízko 99%. Velkou výhodou konvenčních optických odrazných prvků jsou nízké ztráty odrazem a absorpcí. Tyto prvky také pracují bez spektrální odchylky ve značně široké oblasti spektra včetně optického. Parabolické zrcadla, nezávislé na sférických odchylkách, soustřeďují paralelní paprsek do jednoho bodu nebo rozšiřují záření z jednoho bodu, vytvořené vysoce přesným zdrojem.

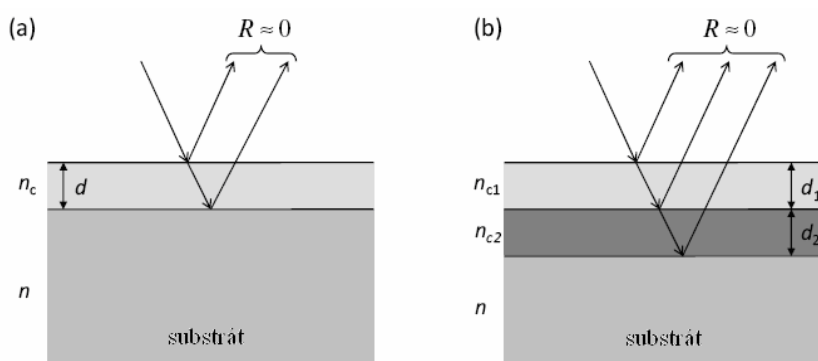
Substrátové čočky, směrové čočky a hyper-hemisferické čočky se začínají používat pro odebrání záření z vysílačů na bázi fotoelektrické vodivosti a jsou připojovány na přijímače. Nízko ztrátové polymery, dielektrika a polovodiče jsou potenciálně dobrými

materiály pro THz čočky. Komerčně dostupné THz čočky pro obecné účely jsou vyrobeny ze silikonu, polyethylenu, teflonu a Tsurupici¹.



Obr. 39 a) Parabolické zrcadlo, b) čočka [2]

Hlavní příčinnou ztrát v THz optických systémech jsou Fresnelovi ztráty nebo ztráty odrazem, protože většina nízko ztrátových dielektrik a polovodičů použitá pro THz prvky má v oblasti THz relativně veliké indexy lomu. Antireflexní povrchové úpravy mohou významně snížit Fresnelovi ztráty.



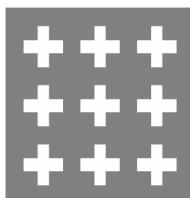
Obr. 40 a) jednovrstvá, b) dvouvrstvá antireflexní povrchová úprava [2]

Na obrázku (Obr. 40) je vidět princip jednovrstvé a vícevrstvé antireflexní povrchové úpravy. Princip antireflexní povrchové úpravy využívá destruktivní interference mezi odraženými vlnami z různých úrovní. [2]

¹ Tsurupica – Terahertz Super Lens, vyvinul Tera-Photonics Research Team Photo-Dynamics Research Center at RIKEN

1.3.2 Pásmové filtry

V THz oblasti se jako pásmové filtry používají tenké kovové mřížky. Optické vlastnosti mřížkových filtrů jsou přičítány pohybu povrchových plasmonových polaritonů na rozhraní kovů a dielektrik. Elektromagnetická vlna působící na kovovou mřížku vyvolá elektromagnetickou indukci ve formě pole vyvolaného tokem povrchových nosičů v uzavřených smyčkách mřížky. Ve stejný moment, se mění šíření nábojů v čase závislém na amplitudě pole, fázi a polarizaci. [2]



Obr. 41 Pásmový filtr [2]

1.3.3 Vlnovody

Vlnovod je zařízení používané pro přenesení elektromagnetických vln bez značných ztrát v intenzitě z jednoho místa na jiné. Nejčastěji používaným materiálem pro radiové a mikrovlnné vlnovody je dutá kovová trubka. Typickým zástupcem mezi vlnovody v optické oblasti je optický kabel. Pro záření v THz oblasti bylo zkoumáno několik mikrovlnných a optických vlnovodů. Hlavní bariérou pro THz vlnovody je relativně velká absorpce ve většině konvenčních vlnovodech, která zabraňuje přenos THz vln na dlouhé vzdálenosti. [2]

Do THz optických komponentů můžeme také zařadit polarizátory, které jsou obvykle tvořeny mřížkou z drátů a vlnové destičky, které se používají pro řízení stavu polarizace záření. [2]

2 APLIKACE TERAHERTZOVÉHO FREKVENČNÍHO PÁSMÁ

2.1 Vesmír

Astronomové se zaměřili na detekční technologie terahertzového záření kvůli mezihvězdným prachovým oblakům s částicemi velkými od 1mm do 100 μ m (14 – 140 K pod okolním pozadím Země).

Sledování tepelných emisních toků stratosférických a v horní části troposférických plynů umožňuje studovat důležité atmosférické jevy jako jsou destrukce ozónu, globální oteplování apod. Heterodynní přijímače s vysokým rozlišením odhalují spektroskopické znaky těchto plynů při frekvencích mezi 300 GHz a 2.5 THz.

Další aplikací THz detektorů je pozorování asteroidů, měsíců a komet. Pomocí těchto pozorování byl prohlouben pohled na vývoj našeho slunečního systému. [1]

2.2 Spektroskopie

Spektroskopie je jednou ze zajímavých aplikací terahertzových technologií, která vychází ze síly emisí nebo absorpčních specifík rotujících a vibrujících nabuzených molekul.

Systémy rychlého snímání a identifikace plynu jako jsou zařízení spektroskopického rychlého snímání sub-milimetrových vln (FASSST - FAsT Scan Submilimeter Spectroscopic Technique) a časově závislé terahertzové spektroskopie jsou na úrovni technických aplikací pro terahertzovou spektroskopii.

Pomocí přesného měření spektra vibrací nízkých frekvencí bude nejspíše možné získat obrázky na atomové úrovni pohybů řetězců polypeptidů a DNA. Očekává se, že tyto vibrace budou součástí oblasti terahertzových frekvencí.

Jedinečné vlastnosti terahertzového záření dělají ze spektroskopie v této oblasti významnou metodu pro farmaceutické a bezpečnostní aplikace. Velké množství materiálů je

pro THz záření polopropustných. Díky této vlastnosti materiálů může terahertzové záření proniknout skrz věci jako oblečení a balící prostředky s konkrétním množstvím pohlcení záření. Tento jev se děje díky nízkým fotonovým energiím a neionizující podstatě terahertzového záření, což umožňuje THz vlny použít pro neinvazivní a nedestruktivní prohlídky za použití spektroskopických a zobrazovacích metod. V THz oblasti vykazuje mnoho chemických látek, farmaceutik a výbušných materiálů charakteristickou spektrální odezvu – výsledkem spektroskopického měření je po té tzv. „fingerprint“ (otisk prstu), který je jedinečný pro každý konkrétní druh látky. Dalšími aplikacemi souvisejícími s THz spektroskopií je zobrazování drog, výbušnin a bio-agentů, nedestruktivní a neinvazivní testování a kontrola, farmaceutická a potravinářská kontrola kvality a medicínská diagnostika. [1]

2.3 Průmysl

V průmyslu se využívá schopnost THz záření pronikat skrz lepenku, papír, suché dřevo, různé barvy, mnoho plastických hmot a keramických materiálů. Například se využívá opticky buzených IR (spektrum vzdáleného IR) laserů pro zjištění malých dutin a rozpoznání jejich velikosti a místa v elektrických napěťových kabelech. Pro zdokonalení terahertzových měřících přístrojů je nejspíše bariérou vysoká cena terahertzových technologií. [1]

2.4 Komunikace

I přesto, že pro terahertzové záření je atmosféra převážně nepropustná bylo navrženo několik uzavřených komunikačních systémů. Využití terahertzových nosičů v bezpečné komunikaci vede k určitým výhodám, kterými jsou malé rozměry antén a velká šířka informačního pásma. Nižší rozptyl a mnohem větší průchodnost terahertzového záření skrz aerosoly a mračka dělá terahertzové signály potenciálně vhodnými pro komunikaci ve stratosféře. [1]

2.5 Simulace podpisů radarového rozptylu

Kvůli krátké vlnové délce terahertzových vln mohou být použity terahertzové zdroje pro ozáření modelů rozměrných objektů za účelem simulace chování studovaného objektu v elektromagnetických polích reálně používaných. Proto, podpis radarového rozptylu (radar cross-section) získaný při mnohem nižších frekvencích stávající výzbroje jako jsou letadla, tanky a bitevní lodě může být zpracován se systémem založeným na terahertzových frekvencích. [1] Je velmi důležité přesné zkoumání podobnostních mechanismů při takto koncipované simulaci reálné situace.

2.6 Terahertzové zobrazování

Zobrazování za pomoci THz frekvencí se v posledních letech velmi rychle rozvíjí. Pozornost si terahertzové frekvence v zobrazování získali kvůli následujícím důvodům: terahertzové záření není ionizující a vzniká pouze vibračními a rotačními stavy molekul zatímco ponechává elektrický stav nezměněný. Z tohoto důvodu je terahertzové záření výrazně bezpečnější než záření rentgenové. Na druhé straně je terahertzové záření schopné prostoupit různými nevodivými materiály. Mnoho materiálů jako plasty, balicí materiály (lepenka), látky, lidská či zvířecí tkáň je prostupných pro THz záření a tyto materiály zanechávají typický otisk („fingerprint“), zatímco skrz ně prochází THz záření. Mnohem větší vlnová délka v porovnání s vlnovými délkami viditelného spektra také dramaticky potlačuje Rayleighův rozptyl. Obecně průchodnost klesá s rostoucí frekvencí. Nicméně v mnoha případech je to dostačující pro vzdálenou detekci ukrytých předmětů. Aplikace terahertzového záření v zobrazování se týká detekce ukrytých zbraní, výbušnin a nášlapných min, zlepšování medicínského zobrazování, mnohem produktivnějšího studování chování buněk a genů, „fingerprintingu“ chemických a biologických teroristických materiálů v obálkách v reálném čase, bezpečnostní prohlídky balíků a lepší kvalitativní kontroly polovodičů. [1]

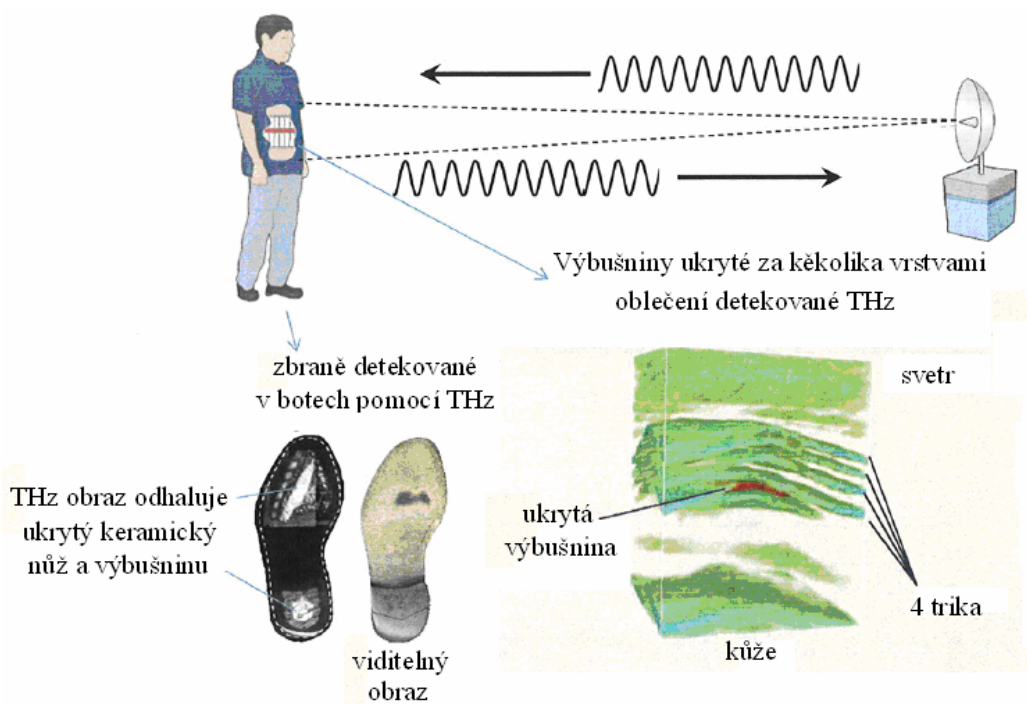
2.7 Medicína

V posledních letech je rakovina rozhodujícím aspektem medicínského výzkumu a snaží se využívat nových detekčních metod. Rakovina prsu je druhou nejčastější rakovinou po rakovině plic a pátou nejčastější příčinnou smrti na rakovinu. Brzké odhalení rakoviny prsu umožní léčbu v ranné fázi a značně snižuje související úmrtnost. Stávající používané kontrolní metody jsou samo pozorování, klinická prohlídka prs, rentgenová mamografie, magnetická resonance (MRI) a ultrasonografie. Mezi technickými kontrolními metodami využívá mamografie rentgenového záření, které poskytují dobré prostorové rozlišení díky krátké vlnové délce, ale je vysoce ionizující a navíc vystavuje pacienta rizikům spojeným s radiací. MRI nepoužívá ionizující záření, nicméně vyžaduje supravodiče a proto kryogenické teploty a to je velmi rozměrné a nákladné. Ultrasonografie je levná, nicméně výsledky jsou slabé vzhledem k malému odstupům signálu od šumu. V posledních letech si získali velkou pozornost mikrovlnné (až 300 GHz) a THz (0.3 až 100 THz) elektromagnetické vlny jakožto výkonné nástroje pro brzké odhalení rakoviny vzhledem k tomu, že poskytují dielektrický kontrast pro zobrazování a ještě jsou neionizující.

Struktura a také chemické složení tkáně může ovlivňovat mechanismus absorpce vody v THz zobrazování. THz zobrazování nechá vzniknout novým schopnostem v diagnostice různých vad v zubech, pokožce, prsech a pevných orgánech, které nejsou zjevné s jinými zobrazovacími metodami. [1]

3 VÝBĚR OBLASTÍ SOUVISEJÍCÍCH S BEZPEČNOSTNÍMI APLIKACEMI

Vývoj metod pro odhalení výbušnin a jiných nebezpečných materiálů začal být více a více atraktivní vzhledem k tomu, že záležitosti okolo veřejné bezpečnosti v posledních letech velmi nabírají na intenzitě. Velmi důležitými cíli je např. detekování většiny výbušných zařízení a nášlapných min. Nášlapné miny byly velmi využívány ve všech druzích válek a je velmi obtížné zajistit, aby explozí jednou nezpůsobily nechtěné následky. Nášlapné miny, které zůstaly po válkách aktivní představují značné nebezpečí pro lidi, vojáky i civilisty, kteří obývají prostředí, ve kterém jsou přítomny nášlapné miny. Dnes je aktivních více než 100 milionů nedetekovaných min na mnoha místech světa. Každý rok zraní nebo usmrtí zůstalé nášlapné miny více než 30 000 osob. [26]



Obr. 42 Technologie detekce výbušnin, zbraní a drog od Teraview [21]

Pro THz bezpečnostní aplikace je stěžejní THz spektroskopie a zobrazování. Využití najde v systémech prohlídek osob a zavazadel na letištích a dalších místech se zvýšenou

potřebou bezpečnosti, pro vzdálené odhalování a rozpoznávání zbraní, výbušnin či jiných nebezpečných předmětů a látek ukrytých pod oděvem či v přenášeném zavazadle. Jedná se tedy o detekci a identifikaci určitých látek a předmětů.

Systémy založené na terahertzovém záření využívají jeho specifické vlastnosti:

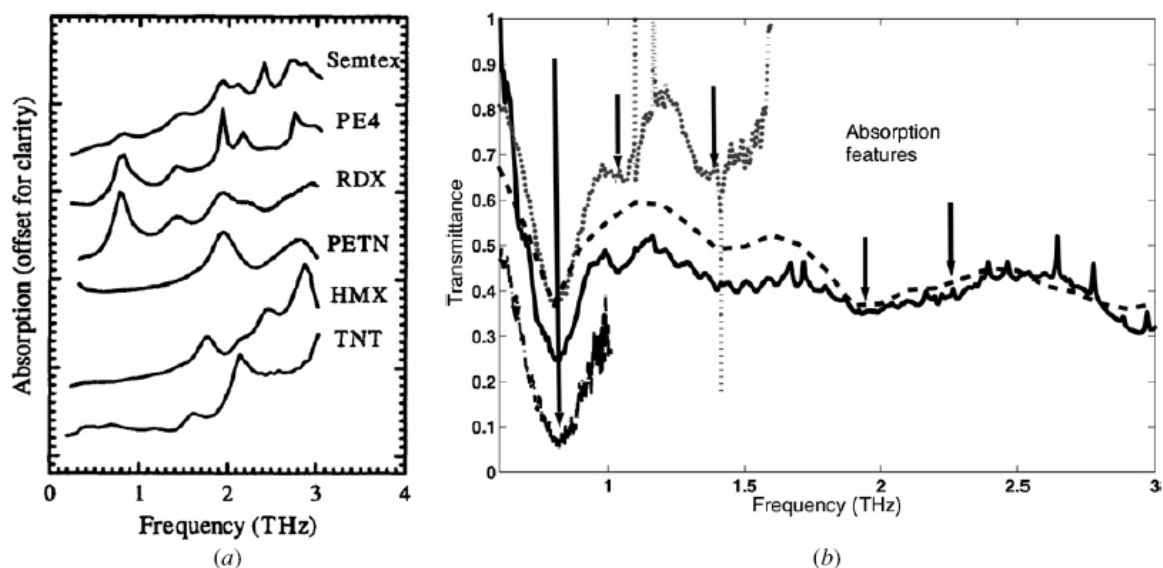
- THz záření prochází skrz materiály jako je např. tkanina a papír, v praxi to znamená možnost snímat předměty pod textilem (přímá kontrola osob, vzdálené pozorování, kontrola zavazadel bez jejich otevírání) a v krabicích, obálcích apod.
- Mnoho materiálů a předmětů významných z bezpečnostního hlediska. jako jsou výbušniny, zbraně, drogy, chemické či biologické látky vykazují jedinečnou spektrální charakteristiku pohlcení záření při určitých frekvencích. Vzhledem k tomuto faktu, je možné identifikovat konkrétní ukrytou látku či předmět.
- THz záření není ionizující, a tudíž bezpečné (podle dosavadních poznání). Tento fakt je velmi podstatný pro osobní prohlídky, kdy je prověřovaná osoba vystavena záření.

3.1 Identifikace výbušnin, zbraní a drog

Využití nedávno vyvinutých THz technologií umožňuje detekci a identifikaci širokého množství materiálů. Některé z nich jsou zajímavé pro zvyšující se úsilí zajistit bezpečnost státu. Hlavní charakteristikou THz spektra je strmost absorpčního maxima zapříčiněného stavy fononů přímo závislých na krystalové mřížce. Tyto výsledky pocházejí z vibrací molekul a intramolekulárními vibracemi v souvislosti např. s RDX. Vibrační stavy jsou jedinečnou a zřetelnou vlastností krystalických výbušných materiálů. Přítomnost mnoha rysů může být zapříčiněna rozptylem ze struktury o rozměrech srovnatelných s délkou THz vlny, což se obvykle vyskytuje v materiálech obsahujících vlákna nebo zrna.

Pro bezpečnostní aplikace je podstatné, že existuje několik charakteristických absorpčních rysů při frekvencích od 0 do 5 THz, což může být využito pro identifikování konkrétní výbušniny nebo drogy. Ve většině případů jsou mezi různými skupinami experimentátorů shodné výsledky měření spektrálních charakteristik. Například na obrázku

(Obr. 43b) je vidět srovnání THz spektra RDX a C4 od [18,19]. V obou experimentech byla zaznamenána charakteristická absorpce při frekvencích 0,8, 1,5, 2,0, 2,2 a 3 THz. Zajímavostí je, že hlavní absorpční rysy RDX jsou stále přítomny, i když je RDX smícháno s materiálem základní hmoty pro vytvoření C4. Spektrální charakteristika při 1,1 THz presentovaná v datech od [19] není přítomna v datech od [18].

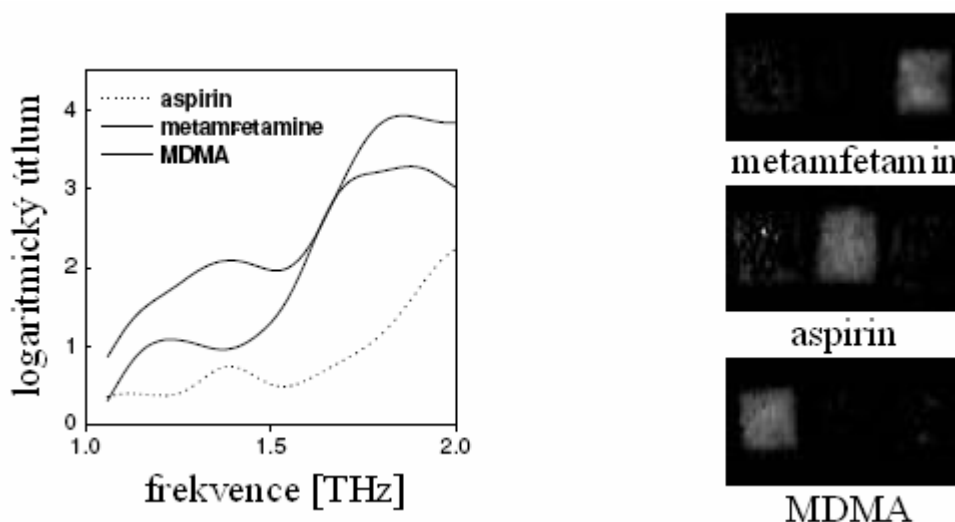


Obr. 43 a) THz spektrální absorpční charakteristiky výbušnin, b) Srovnání THz absorpčního spektra výbušniny RDX a C4 od dvou různých skupin [17]

Prvních devět výbušnin v tabulce v příloze Příloha P I vykazují odlišné THz otisky v rozsahu 0,1 až 3 THz. Vzhledem k tomu, že se z těchto výbušnin šíří páry velmi málo, nabízí THz spektroskopie potenciálně užitečnou detekční alternativní metodu k metodám vyžadujícím relativně velké množství par (více v kapitole 4.2).

Tímto se otevírá otázka detekování amorfních výbušnin (proti vysoce krystalickým výbušninám jako je RDX) využívající THz. Jedním z několika publikovaných výbušných materiálů, které neobsahují ostré charakteristické rysy, ale místo toho monotónně vzrůstající v rozsahu 0 až 3 THz, je amonium nitrát (AN). Z hlediska praxe je to poměrně smolná shoda, protože AN smíchaný s palivovým olejem je silná výbušnina často používaná jako improvizované výbušné zařízení pro bomby do aut. [17]

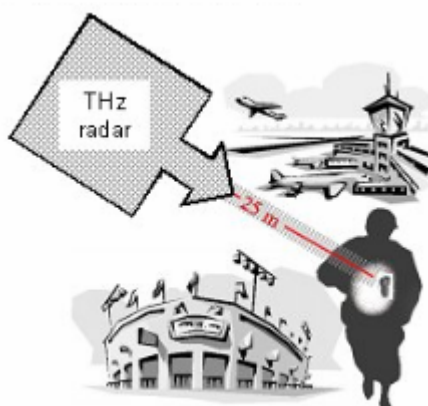
Ve své práci zaměřené na parametrické zdroje a zobrazovací aplikace Kodo Kawase a kolektiv [20] provedli experiment zobrazení a identifikace ilegálních drog umístěných do poštovní obálky. Jako vzorky si pro svůj experiment vybrali tři drogy: metamfetamin (d-metamfetamin hydrochlorid, známý jako „ice“ - led), což je nejčastěji užívaná droga v Japonsku (odkud pochází výzkum), MDMA (dl-3,4-methylenedioxyamfetamin hydrochlorid, známý jako extáze), jež je konzumováno po celém světě a posledním vzorkem pro srovnání byl aspirin. Experimentátoři umístili 20 mg každé látky do malého polyetylenového sáčku. Všechny dohromady potom byly vloženy do běžné poštovní obálky.



Obr. 44 Absorpční spektra drog a jejich rozlišení [20]

Vlevo na obrázku (Obr. 44) jsou vidět absorpční spektra aspirinu, metamfetaminu a MDMA naměřené Kawase a kolektivem. Vpravo jsou vidět jasně identifikované konkrétní drogy pomocí spektrálních charakteristik. Experimentátoři dosáhli spodní hranice detekce při hustotě látky $3\text{mg}/\text{cm}^2$. [20]

3.2 Metody detekce a identifikace v praxi



Obr. 45 Vzdálená pasivní detekce [22]

Pro bezpečnostní aplikace je důležité vytvořit systém, který bude schopný detektovat a určit konkrétní látky či předměty v bezprostřední blízkosti (prohlídka zavazadel a poštovních zásilek) a zároveň bude schopný na velkou vzdálenost detekovat nebezpečné předměty či výbušniny ukryté pod oblečením, v botách apod. (sledování prostorů s vysokým počtem osob jako jsou letiště, stanice atd.).

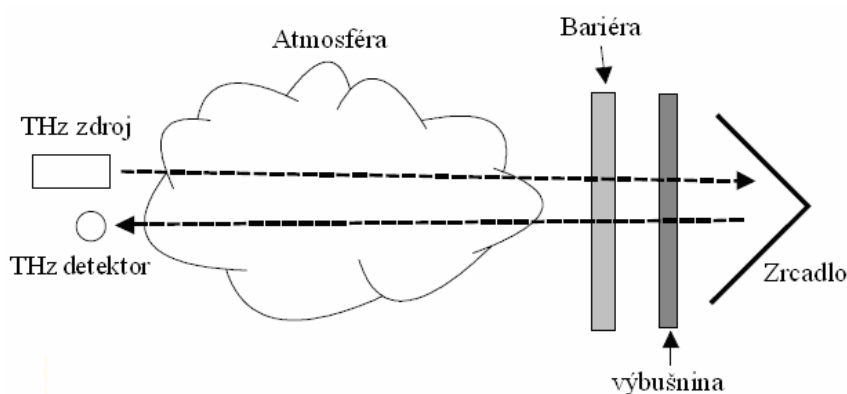
Vzhledem k těmto požadavkům můžeme zobrazovací THz zařízení rozdělit do dvou kategorií:

- zobrazování ze vzdáleného místa,
- blízké zobrazování.

Zobrazovací systémy mohou být vytvořeny na dvou odlišných principech – pasivní zobrazovací systémy využívají přirozeného THz vyzařování z objektů a záření pouze snímají (např. pasivní T 5000 od ThruVision – detekuje ukryté předměty na vzdálenost až 25m, jak je vidět na obrázku v příloze Příloha P II), naproti čemuž stojí aktivní zobrazovací systémy vyzařující do prostoru a snímající odražené záření. Výhodou aktivního zařízení je větší intenzita záření.

Pro THz zobrazování se typicky používá generování a detekce buď pulzním laserem nebo pomocí zařízení spojitě rozdílové frekvence. Pulzní zdroje se zdají být oblíbenější (v oblasti blízkého zobrazování), protože mohou být použity pro získání informace o hloubce. Výhodou pulzní THz časově závislé spektroskopie je, že obsáhlá spektrální informace (0.1 až 3 THz) může být získána během jediného piko-sekundového THz pulzu stejně jako informace o hloubce z rozdílu v čase příchozích krátkých pulzů. Spojité systémy zobrazování mají výhodu ve vysokém THz výkonu při různých frekvencích. Další výhodou spojitě THz spektroskopie oproti pulzní THz časově závislé spektroskopii je, že úzké spektrální charakteristiky je jednodušší měřit za použití spojitých metod, kvůli spektrálně úzkému spojitému THz záření a kvůli postrádání dlouhé snímací zpoždovací linie, která by mohla být vyžadována pro vysoké spektrální rozlišení v časově závislém systému.

Pro vzdálenou detekci je hlavním měřítkem pro rozhodnutí mezi krátkým pulzním nebo spojitým zdrojem potřeba šíření záření atmosférou. Pro aplikace vzdálené detekce je vhodných pouze několik pásem THz frekvencí. Pro THz časově závislé pulzy, které jsou generovány laserovými systémy krátkých pulzů, se THz spektrum pulzů rozprostírá přes několik přenosových pásem. Nicméně, výkon THz záření, který je mimo tato přenosová pásma, je vysoce pohlcován. Následkem čehož množství užitečného THz výkonu v pulzu může být dramaticky sníženo. Pro šíření THz pulzů skrz 2.4m vlhkého ovzduší je 1ps pulz rozšířen na 30ps. Po 100m je čas pulzu značně větší než 100ps.



Obr. 46 Schéma principu vzdálené aktivní detekce [23]

Pro bezpečnostní aplikace THz záření je největší výzvou právě vzdálená detekce. S rostoucí vzdáleností musí být uvažována vlhkost atmosféry, prach, kouř apod. jakožto možné překážky. Měření piko-sekundových pulzů při větších vzdálenostech začíná být problematické. V případě, že chceme překonat ztráty pohlcením překážkami a atmosférou, je nutné vyvinout výkonnější zdroje a ve spojení s tím kompatibilní THz přijímače s malým vlivem okolních šumů. [23]

4 SROVNÁNÍ APLIKACÍ THZ VLN S PODOBNÝMI APLIKACEMI JINÝCH METOD OCHRANY OBJEKTŮ A OSOB

4.1 Srovnání THz a milimetrového zobrazování

Zobrazování pomocí milimetrových vln (MMW) je poměrně dobře vyvinutou technologií. MMW systémy typicky pracují při diskrétní pracovní frekvenci zhruba 30 GHz (300 GHz odpovídá 1 mm vlnové délky). Zatímco MMW systémy lépe pronikají skrz překážky v porovnání s THz systémy, jsou zde dvě důležité výhody THz snímání pro bezpečnostní aplikace – prostorové rozlišení a spektroskopické charakteristické rysy. Terahertzová detekce má zhruba desetkrát lepší prostorové rozlišení v porovnání s MMW systémy jednoduše proto, že vlnová délka THz záření je zhruba desetkrát kratší než vlnová délka MMW záření. Za použití THz snímače jsou následně obrázky podezřelých objektů, jako jsou ukryté kovové nebo plastické nože, mnohem ostřeji a mnohem zřetelněji identifikovány. Druhou důležitou výhodou je unikátnost. Skrz znalost charakteristických THz spekter výbušnin, biologických a chemických prostředků, ilegálních drog může být THz obraz spektrálně analyzován pro identifikování ukrytých látek, předmětů apod. a potenciálních hrozeb. Srovnatelné spektroskopické charakteristické znaky spektra těchto hrozeb nejsou přítomny v MMW oblasti. [17]

4.2 Detektory výbušnin na bázi detekce par a stopových množství výbušnin a drog

Detektory výbušnin na bázi par a stopových množství výbušnin využívají faktu, že se výbušniny uvolňují do okolního prostředí. Tyto detektory výbušnin a drog přijmou malé množství výparů či částic, které jsou zahřívány, ionizovány a následně identifikovány podle plazmagramu. Detektory jsou dnes plně přenosné a schopné detekovat desítky piko-gramů testované látky.[25] Tyto detektory vyžadují stopové množství výbušniny či drogy v plynném stavu nebo ve formě částic. Naproti tomu THz detekce vyžaduje větší množství

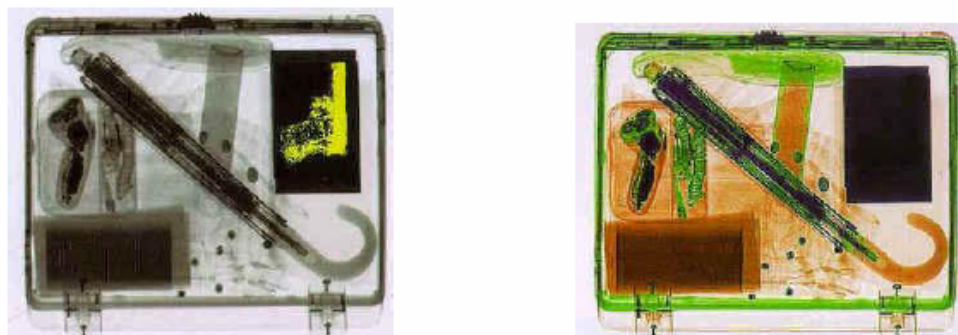
hledané látky. Zatím tedy nemůže být přímým konkurentem detektorů par, ale spíše může být vhodnou kombinací v bezpečnostních aplikacích. THz detekce může oproti detektorům par odhalit přenášení výbušnin či drog dokonale zabalených tak, že neuvolní dostatečné množství stopových látek. Navíc THz detekce je na bázi zobrazování a je okamžitě vidět konkrétní místo, kde se nachází ukrývaná nebezpečná látka.

4.3 Rentgeny

Rentgenování je jeden ze zásadních způsobů bezpečnostního prověřování. Rentgeny jsou základem bezpečnostní prohlídky cestujících, zavazadel, poštovních zásilek na letištích.

Vzhledem k tomu, že THz záření není ionizující, mohlo by se jeho využití u osobních prohlídek na letištích ujmout. Od dnes používaných rentgenů obdrží prohlížená osoba zhruba stejnou dávku záření jako cestující v letadle od slunce za letu dvou hodin ve výšce 10km.[25] THz záření je podle dosavadních poznání životu a zdraví člověka bezpečné. Na druhou stranu THz záření pronikne na povrch lidského těla, nikoliv však skrz něj, čehož využívá rentgen pro zjištění kontrabandu ukrytého v tělních dutinách.

U prohlídky zavazadel není nutné brát ohled na množství ozáření rentgenem. Nicméně THz prohlídka má výhodu v přesnějším definování obsažených látek uvnitř zavazadla. Rentgenový systém bývá obvykle nastaven na zvýraznění předmětů s vysokou hustotou a na barevné rozlišení organických, anorganických a kovových látek.



Obr. 47 Zrentgenované zavazadlo, vpravo s barevným rozlišením dle hustoty obsahu [25]

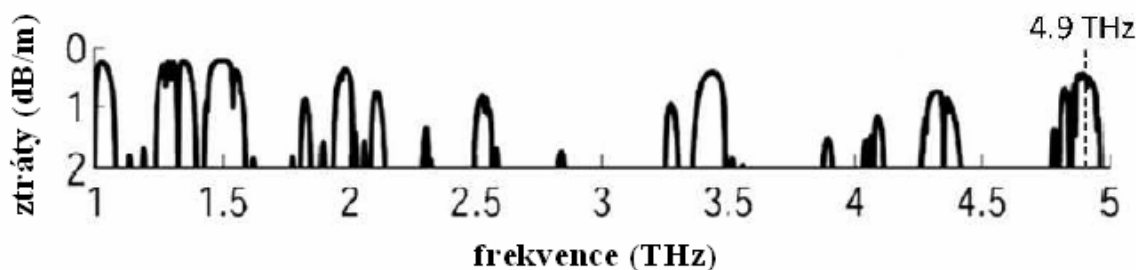
Jak poznamenává Mgr. Ing. Radomír Ščurek, Ph.D. ve svých skriptech [25]: „Existuje značné množství druhů průmyslových a vojenských výbušnin, které mají logicky různé hustoty a protonová čísla, a vždy se najde spousta látek, především organického původu, jejichž hustota a průměrné protonové číslo se budou shodovat s nějakým druhem výbušniny. Navíc na rentgenu musí být pro automatickou detekci nastavena hustota daného druhu plastické výbušniny s určitou tolerancí, neboť i modelováním plastické výbušniny se mění její hustota. Při prohlídkách zavazadel nakládanych do zavazadlových prostorů letadel se počet falešných poplachů pohybuje kolem 20% z celkového počtu zavazadel“. Za pomoci terahertzového zobrazování můžeme s vysokou přesností určit konkrétní látku výbušniny či drog, některých zbraní, případně její skupinu (například. drogy MDMA a d-metamfetamin vykazují stejné spektroskopické rysy a stejně tak např. výbušniny RDX a C4). Vzhledem k tomuto faktu bude pravděpodobně dosaženo nižšího počtu falešných poplachů. Na druhou stranu THz záření nedokáže tolik prostupovat materiálem jako záření rentgenové a odhalení látek ukrytých třeba jen za tekutinou by bylo nemožné. Vhodným by se mohlo zdát využít terahertzového zobrazování jakožto druhého stupně kontroly zavazadel, na který by byli přivedeny pouze zavazadla s podezřením na obsah výbušnin, drog či jiných nebezpečných látek s charakteristickým THz spektrem.

5 PRINCIPY ZOBRAZOVACÍCH A SPEKTROSKOPICKÝCH THZ SYSTÉMŮ

5.1 Zobrazovací systémy

Terahertzové zobrazování můžeme rozdělit na zobrazování pasivní a aktivní. Pasivní zobrazovací systém snímá THz záření produkované všemi organismy, předměty atd. Převádí frekvence THz záření na viditelný obraz (rozlišený v odstínech šedé či barvách). Aktivní zobrazování využívá faktu, že vnějším THz zdrojem vytvořené záření je šířeno skrz nebo pohlcováno či odraženo objekty. Snímáním těmito jevy upraveného THz záření získá systém obraz, jež převádí do viditelné formy. Snímat se dá záření buďto odražené od objektů nebo záření, které prošlo skrz objekty. Aktivní THz zobrazování je možné za použití monochromatických zdrojů jako jsou např. BWO nebo QCL nebo za využití časově závislých THz systémů. [26]

V zobrazování vzdálených objektů pomocí THz je nutné uvažovat prostupnost THz záření atmosférou. Spojité zobrazování je výhodnější než pulsní zobrazování kvůli možnosti zobrazování na velké vzdálenosti při určitých frekvencích, kde je pohlcení záření atmosférou relativně nízké. Na obrázku (Obr. 48) je vidět závislost prostupnosti atmosférou na frekvenci THz záření. Tzv. okna jsou určité frekvence, které vykazují mnohem vyšší prostupnost atmosférou než jim blízké okolní frekvence (často zmiňované jsou 1.5, 3.4 a 4.9 THz). Zobrazování je dále omezeno rozptylem záření, což v praxi přináší nutnost rozhodnout o důležitosti prostupnosti záření, které je nepřímo úměrné frekvenci a o prostorovém rozlišení zobrazování jež je frekvenci úměrné.

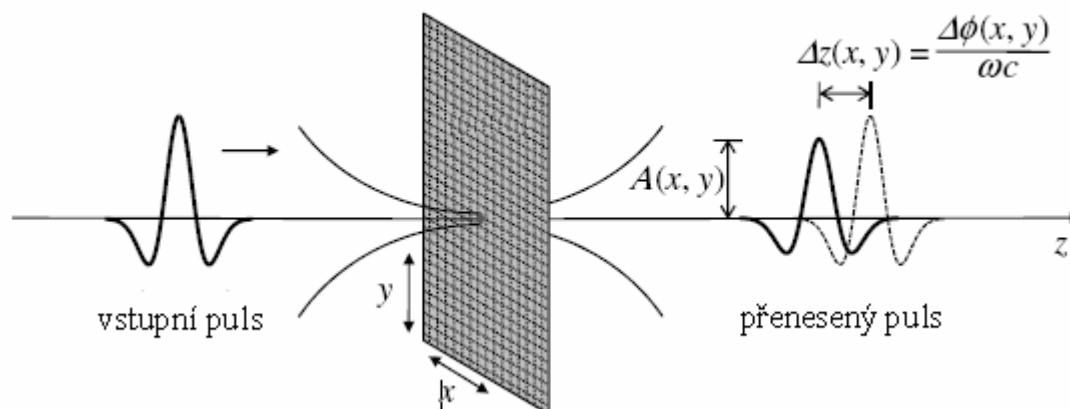


Obr. 48 Závislost prostupnosti THz záření na frekvenci [2]

5.1.1 Zobrazování s širokopásmovými THz pulzy

5.1.1.1 Zobrazování za pomoci amplitudy a fáze

Přímá implementace pulzního THz zobrazování je vytvořena rastrovým snímáním cílového objektu v ohniskové rovině časově závislého THz spektroskopického systému (THz-TDS). Na obrázku (Obr. 49) je vidět přenosové schéma pulzního THz zobrazování. Obraz cílového objektu je získán analyzováním přenesených THz vln. Změny v amplitudě a fázi THz pulzů určují prostorovou různorodost cílového objektu, danou materiálními vlastnostmi jako je index lomu, koeficient absorpce a tloušťka.



Obr. 49 Schéma přenosového pulzního THz zobrazování [2]

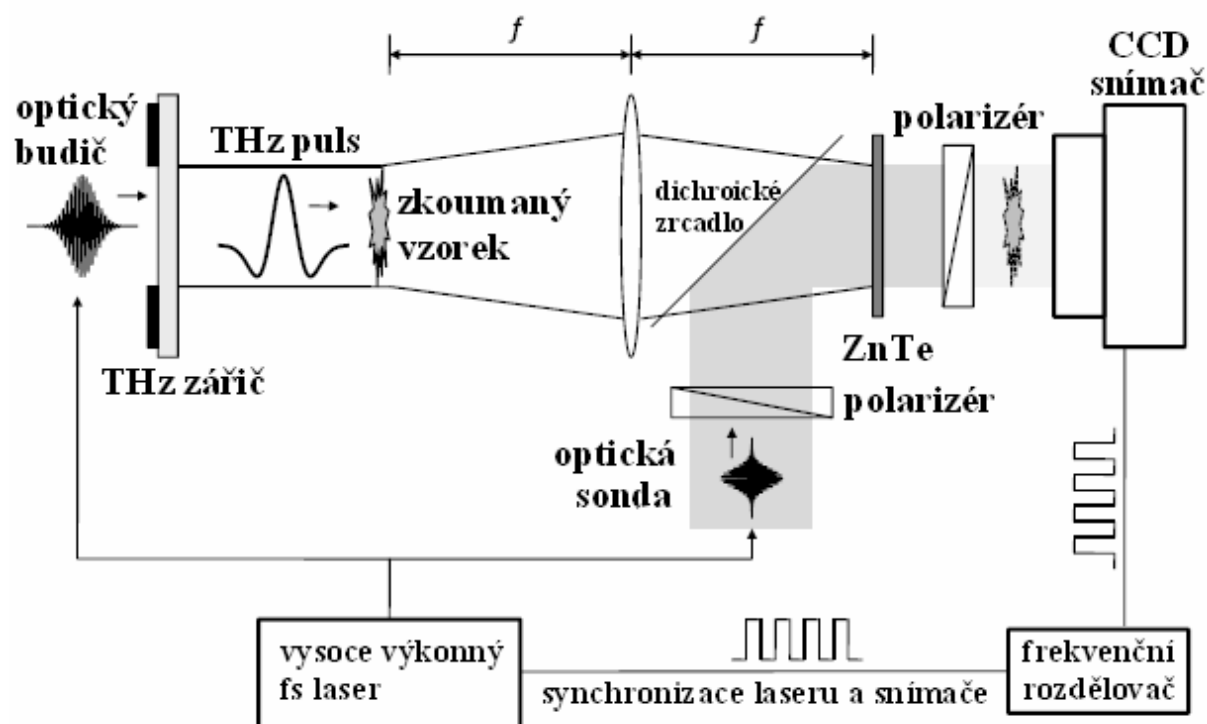
Pulzní THz zobrazování je přirozeně spojeno s metodami všestranné vizualizace, protože THz-TDS obraz obsahuje mnohem více informací než typický 2-D obraz obsahující stejný počet pixelů. Každý pixel THz-TDS obrazu obsahuje celý tvar vlnové délky v určitém čase. Nadměrné množství informace poskytuje mnoho rozdílných voleb zobrazení THz-TDS obrazu. Zvláště je důležitý obsah spektroskopické informace. V časové závislosti je maximální amplituda nebo čas přenosu vlny použit pro zformování 2-D obrazu. Pokud má materiál cílového objektu složité vztahy rozptylu, analýza vlny o něm může přinést důležité

informace. Také je možné zobrazování ve frekvenční závislosti a to se spektrem vlny o tvaru získaném Fourierovou transformací. Jestliže vzorek obsahuje materiál mající spektrální otisk, materiální charakteristiky mohou být přeneseny na obraz pomocí amplitudy nebo fáze při specifických frekvencích spektrálních otisků.

Nevýhodou zobrazování na bázi rastrového snímání je rychlost celého procesu. Typický čas získávání 2-D obrazu je několik minut, což je příliš dlouho pro zachycení pohybujícího se objektu. [2]

5.1.1.2 2-D zobrazování v reálném čase

Rychlost zachycení obrazu pomocí 2-D elektro-optického vzorkování je značně vyšší než u rastrového snímání. Metoda elektro-optického vzorkování byla popsána v kapitole 1.2.1.1.



Obr. 50 Schéma 2-D zobrazování v reálném čase [2]

Na obrázku (Obr. 50) je schéma THz zobrazovacího systému pracujícího v reálném čase na principu 2-D elektro-optického vzorkování. Zobrazování v reálném čase vyžaduje silné THz záření a proto se jako optického zdroje využívá vysoce výkonných femtosekundových pulzů ze zesilovače laseru. V současnosti je nejefektivnější vysoce výkonný THz zdroj foto-elektricky vodivá anténa (více v kapitole 1.1). Alternativním způsobem generování vysoce výkonných THz pulzů je optická rektifikace ve velkém EO krystalu. Velikost THz paprsku je přizpůsobena pro překrytí celého vzorku. Vzorek je umístěn v ohniskové rovině čoček nebo zobrazovacího systému a THz paprsek přenáší obraz vzorku na velký EO krystal. Lineárně polarizovaný paprsek sondy je kombinován s THz paprskem a dále se šíří společně v detekčním krystalu. THz pole způsobí přechodový dvojlom v EO krystalu a následně ovlivní polarizaci sondy. Pouze modulovaná část paprsku sondy, kolmá na původní polarizaci projde skrz druhý polarizátor a je detektována CCD snímačem. CCD snímač a laser jsou časově synchronizovány. [2]

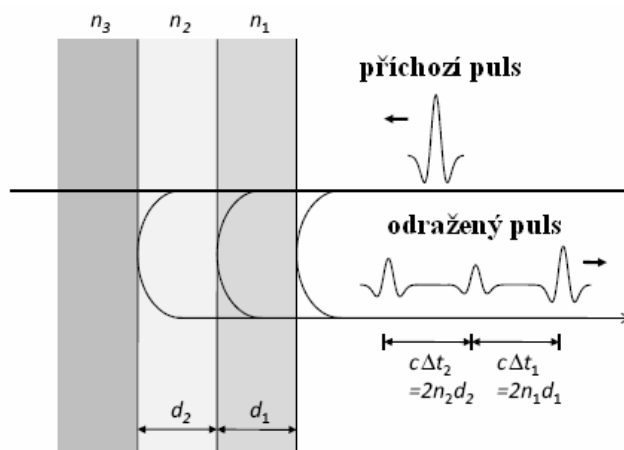
5.1.1.3 THz tomografie

Tomografie odkazuje na zobrazování skrz úrovně tenkých plátků vnitřní struktury 3-D vzorků. Celá 3-D struktura vzorku může být rekonstruována skládáním na sebe navazujících 2-D obrazových plátků. Bylo vyvinuto několik THz tomografických metod za využití vysoké průchodnosti THz záření nepolarizovaných a nekovových materiálů. [2]

5.1.1.3.1 Reflexní tomografie

Schéma časově rozlišené detekce THz-TDS je přímo použitelné pro měření hloubky profilu vzorku s vícevrstvou strukturou. Když dopadne na vzorek krátký THz pulz odražená vlna je složena ze série pulzů odražených od jednotlivých vnitřních úrovní. Pomocí analýzy časů trvání vln může být zaznamenána vnitřní struktura úrovní. Analýza časů trvání

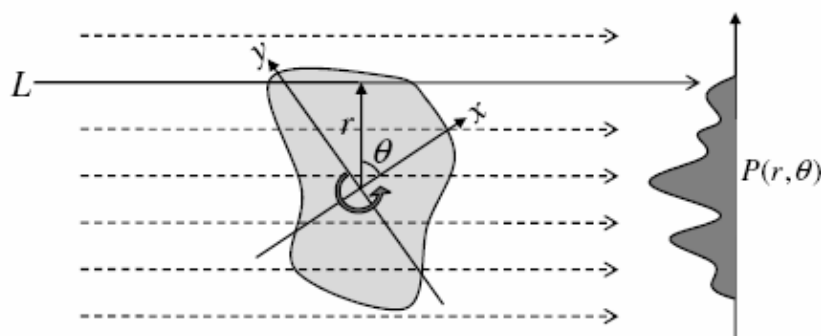
může určit pozice úrovní při rozlišení okolo jednoho mikrometru, protože časové rozlišení příchozího THz pulzu je několik femto-sekund. Profil indexů lomu vzorku může být získán analýzou odrazů na jednotlivých úrovních. [2]



Obr. 51 Schéma reflexní tomografie [2]

5.1.1.3.2 Počítačová tomografie

Počítačová tomografie (CT) obvykle označuje zobrazovací metodu pro vytváření 3-D obrazů vzorku z rentgenových snímků pořízených skrz úrovněmi. CT systém pořizuje 2-D rentgenové snímky vzorku zatímco vzorek rotuje na otočném stole. Samotný rentgenový snímek s 3-D strukturou stlačenou do 2-D roviny není dostatečný pro vytvoření přesné struktury vzorku, kdežto skupina rentgenových snímků pořízená okolo osy rotace obsahuje dostatek informace pro vytvoření obrazů skrz úrovně za pomoci speciálních matematických analýz.



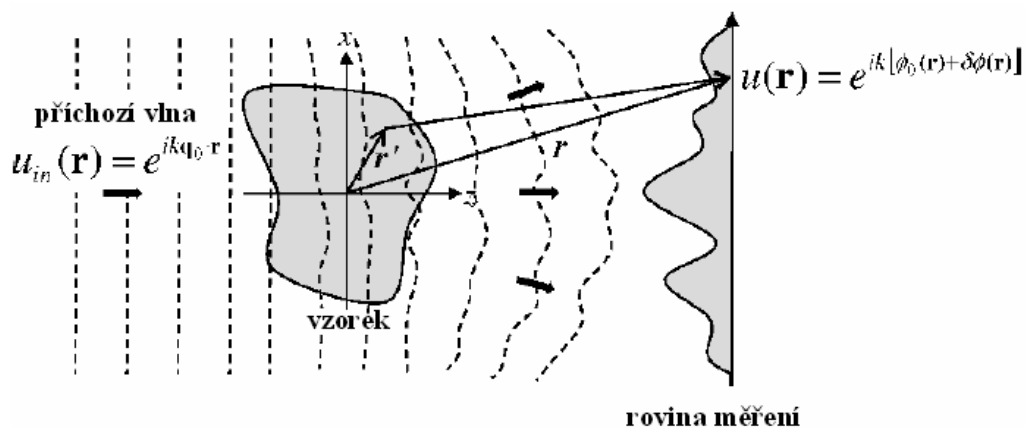
Obr. 52 Schéma počítačové tomografie [2]

Obrázek (Obr. 52) ilustruje základní schéma CT, kde P je rentgenový obraz nebo projekce vzorku při určitém projekčním úhlu a vzdálenosti od osy rotace.

Základní princip rentgenového CT může být přenesen pro THz zobrazování. Jelikož THz CT měří celý tvar vlny vyslaného záření jsou její obrazy bezpodmínečně rozděleny na více úrovní, například 3-D mapu indexů lomů nebo spektrálních podpisů vzorku. [2]

5.1.1.3.3 Difrakční tomografie

Jestliže je vzorek charakterizovaný prostorovými rysy porovnatelnými s vlnovou délkou přichozího záření, projekce přeneseného paprsku skrz vzorek je silně ovlivněna lomem podél šíření. Na obrázku (Obr. 53) je zobrazeno, jak přichozí plošná vlna podstupuje jednotlivé ohyby průchodem vzorku a výsledná deformovaná vlna je projektována na měřicí rovinu.



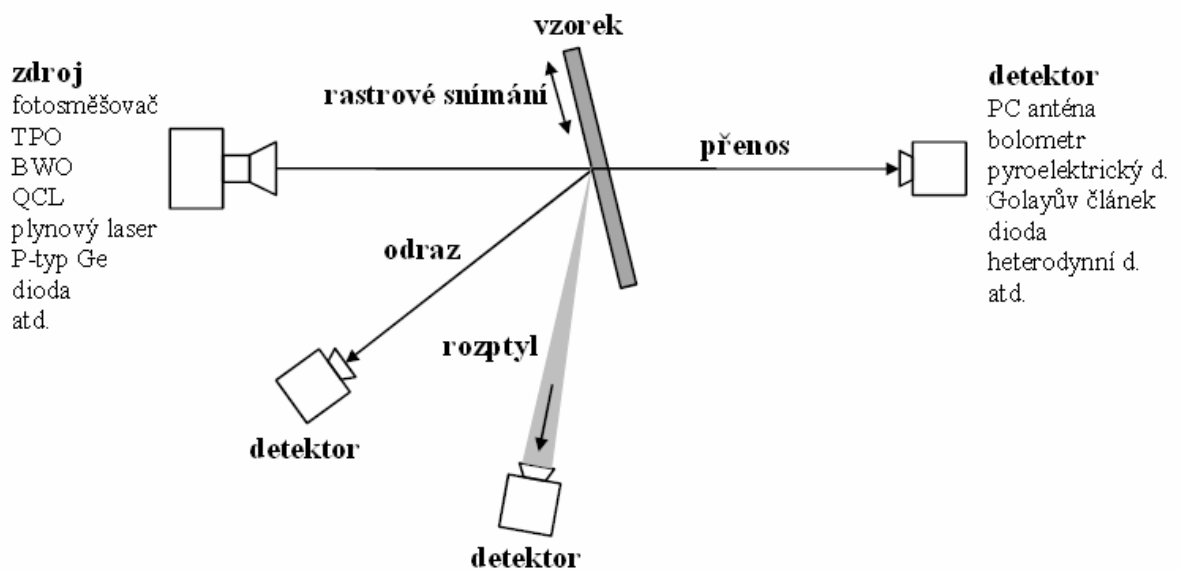
Obr. 53 Schéma difrakční tomografie [2]

Difrakční tomografie se používá pro vytvoření 3-D obrazu indexů lomu za použití algoritmu zpětného šíření, kde vstupem je projekce lomů. [2]

5.1.2 Zobrazování se spojitým THz zářením

5.1.2.1 Zobrazování na bázi rastrového snímání

Rastrové snímání je universální metoda pro THz zobrazování. THz detektory měří výkon buď přeneseného, odraženého nebo rozptýleného záření z cílového vzorku. Výjimku tvoří systém založený na foto-elektrickém směšování. [2]



Obr. 54 Schéma rastrového snímání [2]

5.1.2.2 Zobrazovací systém založený na foto-elektrickém směšování

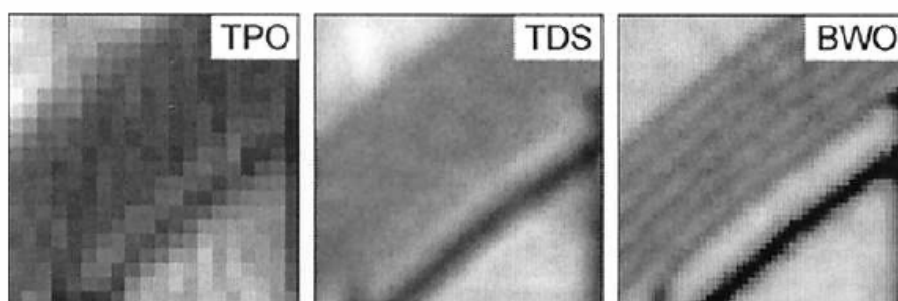
Systém spojitého THz foto-elektrického směšování používá dvou foto-směšovačů, oba jako zářiče a koherentní stejnorodé detektory. Schéma tohoto systému je podobné THz-TDS systému využívajícího PC antény. Oba foto-směšovače jsou aktivovány stejným dvou-frekvenčním laserovým zdrojem. Nejen amplituda, ale také relativní fáze mezi THz vlnou a optickým budičem na přijímači je zaznamenávána jako změna časové prodlevy mezi budičím a snímacím paprskem.

System foto-elektrického směšování může využívat diodového laseru jakožto optického zdroje. Z praktického hlediska je to velká výhoda, protože všechny hlavní komponenty jsou relativně malé optoelektronické zařízení a proto je jednoduché je integrovat v jeden celistvý systém. [2]

5.1.2.3 Zobrazování s oscilátorem zpětném vlny

Oscilátor zpětné vlny je rozměrnější než optoelektronické a polovodičové zařízení, ale jeho výstupní výkon, 100mW pod 200 GHz a okolo 1mW okolo 1 THz, splňuje nezbytnost pro získávání obrazů vysoké kvality. Nadto mohou být pro zobrazovací aplikace použity relativně citlivé detektory pracující při pokojové teplotě jako jsou pyroelektrické detektory.

Vysoce výkonný zobrazovací spojitý THz systém založený na BWO byl představen za použití BWO výstupního výkonu 15 mW při 0.6 THz a s pyroelektrickým detektorem. [27]



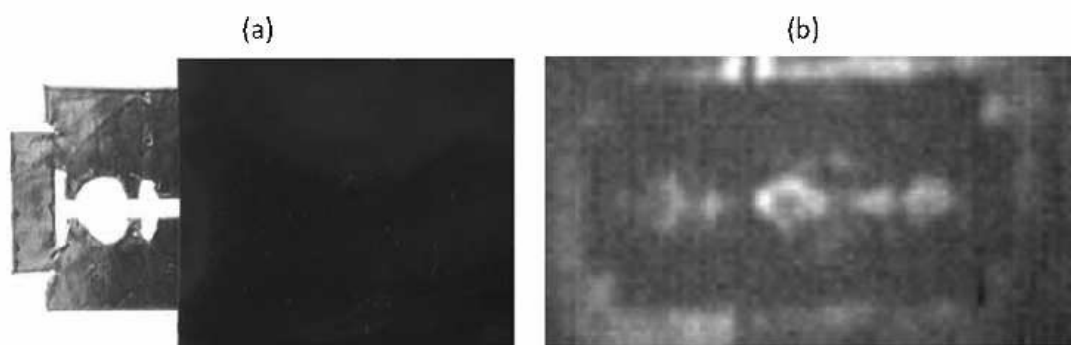
Obr. 55 Srovnání zobrazovacích systémů [2]

Obrázek (Obr. 55) srovnává výkon BWO systému s dalšími THz zobrazovacími systémy založenými na THz-TDS a THz parametrickém oscilátoru (TPO). TPO systém pracuje při frekvenci 1.5 THz a jako detektor používá Si bolometr. Vzorek je tvořen těsně umístěnými kovovými dráty umístěnými do dielektrického prostředí. Vlivem širokého rozsahu ladění je TPO systém užitečný pro spektroskopické zobrazování, přesto prostorové rozlišení je nižší v porovnání s BWO systémem. Přímě srovnání mezi obrazy BWO a TDS není spravedlivé, protože obraz TDS vytvořený omezenou spektrální intenzitou při 0.59

THz nevykazuje plné možnosti TDS systému. Nicméně v těchto podmínkách rozlišuje obraz BWO několik rysů lépe než TDS. [2]

5.1.2.4 Zobrazování v reálném čase za pomoci mikro-bolometrického snímače

Navzdory velkým pokrokům v THz technologiích, spojitě THz zobrazování v reálném čase, zvláště ve spektrálním rozsahu okolo 1 THz, je stále technicky nedokonalé převážně kvůli absenci vysoce výkonných zdrojů a citlivých detektorů. Praktickým způsobem jak se vyrovnat s těmito nedostatky je využít technologií s jiných blízkých oblastí. Sada mikro-bolometrických detektorů, vyvinutých pro tepelné zobrazování, byla navržena pro práci v oblasti dlouhých IR vln a pracuje při pokojové teplotě. Každý pixel mikro-bolometrického snímače je tvořen tenkým filmem oxidu vanadia a silikon nitridu. Obrazy tvořené mikro-bolometrickými snímači v reálném čase jsou komerčně využitelné. Citlivost detektoru při THz frekvencích je neznámá, přesto je vidět (Obr. 56), že snímač je dost citlivý pro pořizování THz obrazů v reálném čase. [2]



Obr. 56 a) fotografický, b) THz – obraz žiletky z části překryté černým polyetylenem [2]

5.2 Spektroskopie

Oblast terahertzových frekvencí v elektromagnetickém spektru je velmi důležitá kvůli velkému množství fyzikálních a chemických procesů. Nedávno vyvinutá THz časově závislá spektroskopie poskytuje výkonnou metodu pro výzkum těchto fyzikálních a chemických procesů.

V principu je THz-TDS systém koherentního vytváření a zpracování záření, které vytváří jednookruhové THz pulzy a detekuje je při rychlosti opakování cyklů 100MHz. Signál je detekován ve formě elektrického pole a pomocí Fourierovi transformace pulzů signálu je získána informace o amplitudě a fázi přes celé spektrum.

THz-TDS nabírá na své důležitosti a je používána nejen pro běžné fyzikální a chemické materiály ale také pro biologické látky nebo materiály nových technologií. [28]

Pro měření spektrálních vlastností zkoumaného vzorku je třeba nejdříve zaznamenat tvar THz vlny referenčního vzorku, kterým je volný prostor. Tvar THz vlny referenčního vzorku je nazýván referenční tvar. Tvar THz vlny vyslaný skrz zkoumaný vzorek je nazýván tvar vlny signálu. Pomocí Fourierovi transformace tvarů referenční a signálové vlny se získá referenční a signálové spektrum. Vlastnosti spektra zkoumaného vzorku mohou být získány porovnáním signálového a referenčního spektra.

V praxi lze pro měření použít dva vzorky ze stejného materiálu, ale z rozdílnou tloušťkou s tím, že jeden vzorek představuje referenční a druhý zkoumaný. V tomto případě odpadají Fresnelovi ztráty na povrchu vzorků. Komplexní index odrazu vzorků může být měřen dalšími typy spektroskopie, jako jsou odrazová spektroskopie nebo difúzně rozptylová spektroskopie. THz-TDS měří elektrické pole THz pulzu, čili jeho amplitudu a fázi, díky čemuž jsou získány informace o absorpcích a rozptylech vzorku cílového vzorku.

THz-TDS má několik výhod v porovnání s jinými druhy spektroskopií. THz-TDS poskytuje koherentní spektroskopickou detekci v širokém rozsahu THz frekvencí, které je obtížné dosáhnout pomocí jiných metod. THz pulzy mají periodu v řádech piko-sekund, proto mají vysoké časové rozlišení, což je velmi vhodné pro měření dynamické spektroskopie. THz-TDS mají obvykle velký odstup signálu od šumu, což je zvláště

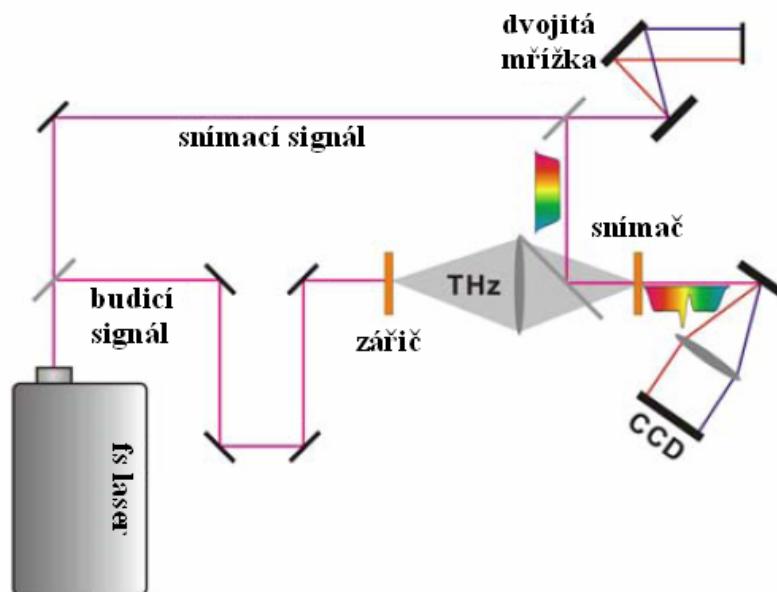
užitečné pro spektroskopické měření signálů s obsahem velkého množství šumových frekvencí, které jsou srovnatelně nebo dokonce více intenzivní než signál.

V THz-TDS systémech je také prostor pro rozvoj. THz-TDS je obvykle pomalá kvůli časovému vzorkování THz pulzů. Systémy THz-TDS mohou dnes dosáhnout jednoho měření v čase menší než jedna sekunda s poměrně vysokým odstupem signálu od šumu. THz-TDS ve skutečných měření také trpí nízkým spektrálním rozlišením kvůli omezenému času snímání. V principu může být snímán THz pulz tak dlouho, jak je potřeba. Nicméně delší snímání nejen že přináší delší čas pořizování dat, ale také snižuje dynamické vlastnosti spektrometru. Omezení spektrálního rozlišení není problém v případě měření spektra vzorku v zahuštěném stavu, jehož spektrální vlastnosti mají často šířku pásma několik desítek THz. Spektrální rozlišení může být nedostatečné v případě měření plynů.

Typický THz-TDS systém pracuje na frekvencích v rozsahu od 0.1 do 3 THz, nicméně použitím Krátkých laserových pulzů je možné dosáhnout nad 10 THz. Dokonce může být dosaženo 100 THz šířky pásma použitím krátkých laserových pulzů s tenkým EO krystalem jakožto zářičem i snímačem. Nicméně dynamické měření je často omezené pro THz-TDS systém s velmi širokým pásmem. [26]

5.2.1 Detekce tvaru THz vlny za použití jednoho laserového pulzu

Vzorkování THz vlny obvykle vyžaduje skupinu THz a snímacích pulzů s různým časovým rozlišením. Nicméně jestliže je THz pole dostatečně silné, je možné zachytit celou THz vlnu za použití jediného laserového pulzu. Pro detekování THz vlny za použití jediného pulzu může být dosaženo pomocí různých metod, mezi které patří zhodnocení THz vlny prostorovým přenosem snímacího pulzu nebo spektrální přenos snímacího pulzu. Metoda detekce jediným pulzem poskytuje značné snížení času získávání informace a obrovsky zvětšuje použitelnost THz systému pro aplikace, kde je vzorek v pohybu.



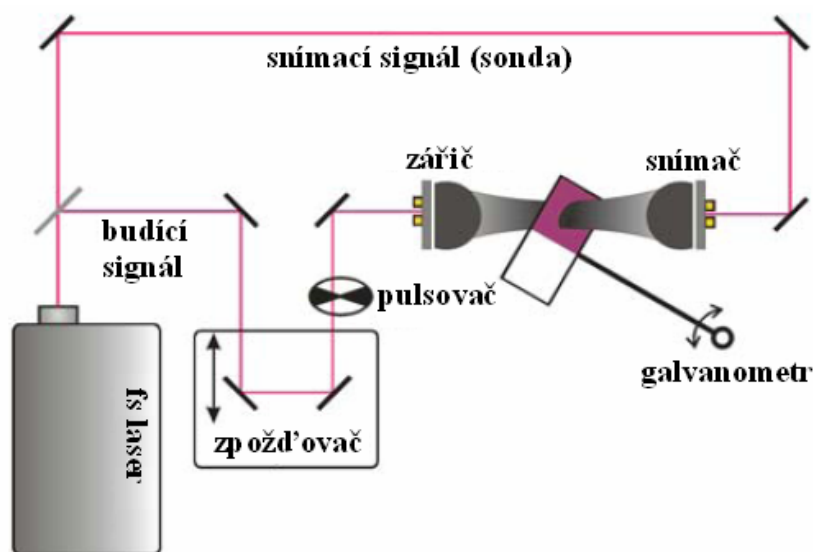
Obr. 57 Schéma měření THz vlny za použití rozmítaného snímacího signálu [26]

Na obrázku (Obr. 57) je vidět schéma měření THz vlny za použití rozmítaného snímacího signálu. Schéma je podobné běžnému THz-TDS měření, kde je paprsek ultra rychlého laseru rozdělen na budičí a snímací paprsek, zatímco budičí paprsek je iniciátorem vzniku THz pulzů a snímací určen pro jejich detekci. Nicméně v systému detekce rozmítaným signálem není žádný zpožďovací komponent. Namísto toho je optický budičí signál frekvenčně rozmítaný a časově prodlužován dvojitou mřížkou z méně než jedné piko-sekundy na několik desítek piko-sekund. Výstupem mřížek je pulz s délkou pulzu a vlnovou délkou lineárně proměnnou v čase. Rozmítaný snímací signál je modulován THz signálem, když jsou sloučeny v EO krystalu. V principu může být viděn rozmítaný snímací signál jako posloupnost krátkých pulzů s rozdílnými délkami, kde každá z těchto vlnových délek šifruje rozdílnou část THz signálu. Spektrometr prostorově odděluje rozdílné vlnové délky a proto odkryje THz signál. Výstupní signál spektrometru je měřen CCD snímačem. [26]

5.2.2 Rozdílová THz spektroskopie

Pro THz-TDS měření je obvykle použita lock-in metoda za účelem potlačení šumu. Pro užívání lock-in metod je detekční signál modulován při několika frekvencích. Modulační

frekvence představuje referenční frekvenci lock-in zesilovače. Pouze několik prvků vstupu, které mají stejnou frekvenci a určité fázové posuny s referencí je zesíleno a zaznamenáno. Všechny ostatní prvky jsou odděleny od záznamu. Proto je obrovský šum odstíněn vlivem frekvenční a fázové selekce. Používání lock-in metod může potlačit úroveň šumu o šest řádů oproti původní úrovni šumu. Začleněním lock-in technologie do THz-TDS měření pomocí modulování THz zdroje, může být efektivně snížen šum vytvářený detekčním systémem a stejně tak šum spojený s laserovým paprskem sondy. Nicméně tato metoda nemůže snížit šum spojený s THz vlnami kvůli tomu, že je šum také modulován na stejnou frekvenci. Pokud je cílový vzorek tenký film nebo materiál ve stopovém množství, THz pole je modulováno velmi slabě. Tato slabá modulace může být skryta pod šum spojený s THz polem. Za těchto podmínek může být použita metoda rozdílové spektroskopie, která měří přímo rozdíl mezi cílovým a referenčním vzorkem.



Obr. 58 Schéma časově závislé rozdílové spektroskopie [26]

Obrázek (Obr. 58) zobrazuje schéma THz časově závislé rozdílové spektroskopie, kde je použita metoda lock-in. Jsou zde v sérii zapojeny dva lock-in zesilovače. V měření rozdílové spektroskopie prochází THz paprsek střídavě přes cílový a referenční vzorek. Například se dá použít galvanometr pro pohyb vzorku do a mimo THz paprsek. [26]

6 NÁVRH MOŽNOSTÍ THZ VÝZKUMU A VÝVOJE VE VZTAHU K UTB FAI

Jak již bylo zmíněno v úvodu, Fakulta aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati (dále jen FAI) se chystá pořídit THz zařízení. V rámci Operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace získala FAI dotace, které využije pro Regionální výzkumné centrum „CEBIA-Tech“. Jedním z klíčových směrů realizovaných výzkumných a vývojových aktivit je „vývoj systému pro detekci a analýzu nebezpečných látek s využitím THz frekvencí“.[29] Cílem pozornosti se tedy stává spektroskopické zařízení pevných látek. Podle ústního sdělení [34] se výběr zúžil na zařízení od anglické firmy TeraView a na výrobce Picometrix ze Spojených států amerických. Značnou výhodou zařízení TeraView je na rozdíl od Picometrixu kompaktnost a aplikační zaměření celého dodávaného systému; Picometrix dodává komponenty systému, které je nutné propojit a oživit.



Obr. 59 TeraView TPS spectra 3000 [32]

Podle TeraView je TPS spectra 3000 prvním světovým komerčním terahertzovým spektrometrem schopným vykonávat měření pomocí absolutního odrazu i průchodu záření. TPS spectra 3000 je THz zařízení pulzního zobrazování a spektroskopie. [32]

Využití tohoto zařízení bude spočívat ve výzkumu THz aplikací a případně ve vývoji prvků systému. Návrhy možností THz výzkumu a vývoje ve vztahu k FAI, které zde uvádím, jsou pouze obecného charakteru ve smyslu, jakým směrem by se mohl THz výzkum a vývoj v rámci FAI ubírat.

Jeden ze směrů výzkumu se nabízí v souvislosti se studijním oborem Bezpečnostních technologií, systémů a managementu. Výzkum zaměřený na bezpečnostní technologie by sestával z prohlubování znalostí o zobrazování, konkrétně odhalování skrytých nebezpečných předmětů nebo látek a o spektroskopii využívané pro identifikaci nebezpečných látek jako jsou drogy, výbušniny apod. Znalosti o chování materiálů v oblasti THz frekvencí se neustále rozšiřují a jsou zde stále značné možnosti dalšího výzkumu.

Dalším možným zaměřením výzkumu by mohla být THz komunikace. Výzkum, potažmo vývoj by spočíval v návrhu a vytvoření malého uzavřeného komunikačního systému s přenosovou rychlostí zasahující do Tbit/s. Komunikace v oblasti THz je velikou výzvou nejen pro vysokou přenosovou rychlost, ale také pro aplikace bezpečné komunikace.

Jiný vývojový směr by mohl být zaměřen na optiku THz systémů; především pak na vývoj čoček, který by spočíval ve vytváření čoček pro THz systémy z různých materiálů k dosažení požadovaných vlastností, jimiž jsou co nejnižší odraz, pohlcení a vysoká směrovost záření. Nyní se v praxi běžně používají čočky z materiálů jako je polyetylen, teflon či silikon, ale další jsou ve vývoji. Vysoká směrovost čoček vychází z jejich tvaru, jenž může být také předmětem výzkumu. Nabízí se zde také možnost spolupráce se studijním oborem Polymerní materiály a technologie na Technologické fakultě.

7 ODHAD PRAVDĚPODOBŇHO VÝVOJE V THZ OBLASTI

Terahertzové technologie a jejich aplikace se velmi rychle rozvíjejí. Důležitým bodem rozvoje THz technologií je vytvoření vysoce výkonných, a přesto rozměrově malých zařízení, které následně umožní více možností v aplikační sféře. Vývoj THz technologií bude tedy v blízké budoucnosti především zaměřen na vytvoření výkonných zdrojů, citlivých detektorů a kvalitní nízkoztrátové optiky se snahou dosáhnout co nejmenších rozměrů zařízení.

Vzhledem k ceně terahertzových technologií jsou aplikace THz systémů velmi omezovány, ale jedná se o průvodní jev téměř každé nové technologie. V momentě dosažení ceny přijatelné pro komerční využití se bude pravděpodobně výroba masově rozšiřovat.

V oblasti fyzické bezpečnosti se THz technologie pravděpodobně stanou jedním z žádaných systémů. Bude se jednat především o bezpečnost na místech významných vysokým počtem pohybujících se lidí (letišť, zábavní parky, stanice metra apod.) či zvýšenou potřebou ochrany (banky, vojenské prostory apod.). THz zobrazovací systémy pravděpodobně budou dosahovat vysokého rozlišení na poměrně velké vzdálenosti (omezené prostupností THz záření atmosférou), čímž budou představovat důležitý prvek v časném odhalení potenciálních hrozeb tvořených především skrytými předměty přenášenými pod oblečením, v zavazadlech či jiných přenosných předmětech. Včasná detekce těchto látek či předmětů dává možnost reagovat v reálném čase a zamezit jejich zneužití ve sledovaných prostorech. Typickým příkladem by mohl být pokus o výbuch v letadle na trase Amsterdam-Detroit, kde se v roce 2009 Abdul Faruka Abdulmutalláb pokusil odpálit chemickou reakcí výbušninu PETN, kterou propašoval zašitou ve spodním prádle. Výbušnina PETN je velmi silnou trhavinou, často používanou pro teroristické útoky, její nevýhodou je však náročnost dosažení detonace, díky čemuž se útočníkovi výbuch nezdařil.[31] V případě, že by na letišti existoval THz kontrolní systém, kterým by musel každý pasažér projít před vstupem do prostor letiště nebo až do letadla, byl by tento atentátník odhalen dříve, než začal ohrožovat posádku letadla. Výbušnina PETN by byla odhalena vzhledem k prostupnosti THz záření oblečením a ke spektrální charakteristice PETN. Podobných případů se v minulosti událo více.

V ostatních odvětvích, kde se začínají uplatňovat THz technologie, bude docházet k postupné implementaci THz systémů ovlivněné cenovou dostupností a zdokonalováním

technologií. V komunikaci se dá očekávat velký rozmach THz technologií, pokud se podaří vytvořit dostatečně silné zdroje; tato komunikace se bude týkat především kratších vzdáleností, např. v rámci podniků a také komunikace ve stratosféře, případně se THz komunikace bude využívat jako bezpečná komunikace. V medicíně by mohlo dojít k rozšíření THz systémů, především jakožto částečné náhrady rentgenů u zkoumání povrchu těla, případně otevřených zlomenin. Ve stomatologických ordinacích možná jednou budou THz zobrazovací systémy, které odhalí zárodky kazů v zubech s desetkrát větší přesností než dnes používaný rentgen, a navíc bude tento systém zdraví neškodný. Dá se očekávat, že s hlubším poznáním chování látek a materiálů v THz oblasti přibudou nové aplikační výzvy.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

8 VYTVOŘENÍ VZORKŮ PRO ANALÝZU V OBLASTI TERAHERTZOVÝCH FREKVENČÍ A VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU RAMANOVY SPEKTROSKOPIE

Při zadávání tématu této diplomové práce bylo počítáno s pořízením THz zařízení na FAI, které mělo být mimo jiné využito pro provedení spektroskopických měření v rámci této práce. Pořízení THz zařízení se oddálilo kvůli zpoždění projektu v rámci Regionálního výzkumného centra CEBIA-Tech, a proto nebyla provedena žádná měření v THz oblasti. Nicméně byla provedena Ramanova spektroskopie, která je velmi důležitá při identifikaci chemického složení látek a je svým charakterem blízká THz spektroskopii.

8.1 Příprava vzorků

Jako vzorky byly vybrány list marihuany (vzorek 1) a kopřivy (vzorek 2), kde první zmíněný představuje látku, která je charakteristická svým použitím jako droga a léčebný prostředek (obsahuje účinnou látku tetra-hydro canabis), zatímco druhý představuje vzorek pro srovnání.

List marihuany byl odejmut ze šlechtěné rostliny odrůdy „bílá vdova“, pěstované v domácích podmínkách, kdežto list kopřivy byl utrhnut z volně rostoucí rostliny kopřivy dvoudomé (*urtica dioica*). Oba listy byly po umístění do papíru, položení na plech a zatížení knihou sušeny na ústředním topení. Z hlediska měření je tento bod velmi důležitý, protože list obsahující vodu bude vykazovat v terahertzovém spektru jiné vlastnosti než list suchý, jak dokazuje např. studie o měření obsahu vody v listech pomocí THz spektroskopie. [30] Po vysušení byly listy zalisovány do polyesterové fólie (tloušťka jedné vrstvy je 80 μ m) a označeny popiskem (Obr. 60).



Obr. 60 Připravené vzorky pro spektroskopické měření: vlevo list marihuany odrůdy bílá vdova, vpravo list kopřivy dvoudomé.

8.2 Měření za využití Ramanovy spektroskopie

FAI disponuje zařízením pro spektroskopii na bázi Ramanova jevu. Ramanova spektroskopie byla na těchto vzorcích provedena z důvodu blízkosti této spektroskopie s terahertzovou. Ramanův jev totiž vychází z Ramanova rozptylu, který vzniká při interakci mezi fotony dopadajícího světla s vibračními a rotačními stavy atomů nebo molekul (optických fononů), kdy rozptýlené záření má jinou vlnovou délku (resp. energii fotonů) než dopadající záření, což je způsobeno interakcí rotačních a vibračních stavů molekul s velmi silným budícím zářením (laser).

[33] Ramanova spektroskopie umožňuje identifikovat molekulární skupiny materiálu a látek ukrytých v průhledných obalech. Z tohoto hlediska je Ramanova spektroskopie velmi užitečná pro analýzu chemického složení látek. Nepříjemnou vlastností při studiu přírodních látek je vznik luminiscenčních jevů, které svojí intenzitou překrývají Ramanovo

spektrum. THz záření vedle toho vzniká vibračními a rotačními pohyby molekul, ale energie použitého záření nevytváří vybuzení luminiscenčního jevu v materiálech.

Ramanovo spektroskopické měření provedené na připravených vzorcích potvrdilo fakt, že laserové záření vyvolává na těchto přírodních látkách luminiscenci, která překrývá Ramanovo spektrum. Lze tedy poznamenat, že terahertzová spektroskopie vzhledem k tomu, že nevyvolává luminiscenční jevy, bude ve zjišťování molekulární skupiny takovýchto přírodních látek přinejmenším úspěšnější a pravděpodobně dosáhne přesného výsledku, a tím identifikace látky, případně její molekulární skupiny.

ZÁVĚR

Diplomová práce na téma využití terahertzových frekvencí v bezpečnostních aplikacích byla vytvořena čerpáním převážně z cizojazyčné literatury, odborných příspěvků publikovaných různými vědeckými skupinami z celého světa a informačních materiálů od výrobců THz zařízení. Terahertzové technologie jsou velmi mladým a progresivním technologickým odvětvím. Jedním s důkazů může být např. fakt, že v letošním roce vyšlo první číslo časopisu IEEE Transaction on terahertz science and technology. [35]

Teoretická část diplomové práce je věnována popisu stávajícího stavu THz techniky. Rozdělena je na tři podkapitoly jednotlivě se zabývající zdroji, detektory a optikou THz zařízení. Dále jsou vytyčeny hlavní aplikační oblasti THz technologií a vybrány aplikační směry související s bezpečnostními aplikacemi. Teoretická část práce také zahrnuje srovnání aplikací THz vln s podobnými aplikacemi jiných metod ochrany objektů a osob. Dále jsou to principy zobrazovacích a spektroskopických THz systémů a návrh možností THz výzkumu a vývoje ve vztahu k UTB FAI, jimiž jsou především vývoj systému pro detekci a analýzu nebezpečných látek s využitím THz frekvencí, uzavřený systém THz komunikace a optické prvky THz zařízení. V závěru teoretické části jsem se pokoušel odhadnout pravděpodobný vývoj v THz oblasti.

V praktické části jsem se zabýval přípravou vzorků pro měření v terahertzové oblasti. Při zadávání diplomové práce bylo v plánu provést taktéž měření na terahertzovém zařízení, ale vzhledem k faktu, že se opozdil projekt v rámci Regionálního výzkumného centra CEBIA-Tech, došlo ke zpoždění výběru a pořízení THz zařízení. Za těchto okolností nebylo možné na připravených vzorcích provést měření v THz oblasti. Praktická část je dále věnována měření Ramanovy spektroskopie připravených vzorků pro srovnání s terahertzovým spektrem.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

The thesis on the use of THz frequencies in security applications has been developed mostly from foreign technical books and magazines, scholarly articles published by various scientific groups from around the world and the information of manufacturers THz devices. Terahertz technology is very young and progressive technology industry. One of the evidence may be the fact that the first issue of the journal IEEE Transaction on terahertz science and technology has been released this year. [35]

The theoretical part of the thesis is devoted to the description of the current state of THz technology and divided into three subsections dealing with individual sources, detectors and THz optics facilities. Also the main areas of application of THz technology are identified and application guidelines related to security applications selected. The theoretical part also includes a comparison of applications of THz waves with similar applications of other methods of objects and people. Included are also principles of THz imaging and spectroscopic systems and options of THz research and development in relation to FAI UTB were designed. These are primarily the development of a system for detection and analysis of hazardous compounds using THz frequencies, the closed communication THz system and optical components THz devices. In conclusion of the theoretical part, I tried to estimate what will be developments in the THz region like.

In the practical part, I was dealing with preparation of samples for measurement in the terahertz range. It was also planned to carry out measurements on terahertz device, but because of the fact that the project under the Regional Research Centre CEBIA-Tech was delayed, the selection and purchase of THz device delays. Under these circumstances it is not possible to perform measurements prepared samples in the THz region. The practical part is devoted to Raman spectroscopy measurements of prepared samples for comparison with the terahertz spectrum.

SEZNAM POUŽITÉ 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://department.fzu.cz/lts/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. Dostupné z WWW: <http://www.rpi.edu/~wilkei/wilke_THz_book_chapter.pdf>. ISBN 13:978-0-8493-7525-5.
- [5] Zhang, X. C. et al., Generation of femtosecond electromagnetic pulses from semiconductor surfaces, *Appl. Phys. Lett.*, 56, 1011, 1990.
- [6] Chuang, S. L. et al., Optical rectification at semiconductor surfaces, *Phys. Rev. Lett.*, 68, 102, 1992.
- [7] Gu, P., et al., Study of THz radiation from InAs and InSb, *J. Appl. Phys.*, 91, 5533, 2002.
- [8] Nahata, A., Weling, A. S., and Heinz, T. F., A wideband coherent terahertz spectroscopy system using optical rectification and electrooptic sampling, *Appl. Phys. Lett.*, 69, 2321, 1996.
- [9] Liu, K., Xu, J., and Zhang, X. C., GaSe crystals for broadband terahertz wave detection, *Appl. Phys. Lett.*, 85, 863, 2004.
- [10] Kawase, K., et al., Coherent tunable THz-wave generation from LiNbO₃ with monolithic grating coupler. *Appl. Phys. Lett.*, 68, 2483, 1996.

- [11] STILLHART, Marcel, et al. Organic Crystals for THz Wave Applications. In *Proceedings of the Symposium on Photonics Technologies for 7th Framework Program* [online]. Zurich, Switzerland : [s.n.], 2006 [cit. 2011-03-23]. Dostupné z WWW:
http://www.opera2015.org/deliverables/D_4_3_Wroclaw_Symposium/articles/43_Gunter.pdf>.
- [12] SCHNEIDER, Arno; STILLHART, Marcel; GÜNTER, Peter. High efficiency generation and detection of terahertz pulses using laser pulses at telecommunication wavelengths. In *Optics express* [online]. Zurich, Switzerland : [s.n.], 2006 [cit. 2011-03-23]. Dostupné z WWW:
<http://www.opticsinfobase.org/view_article.cfm?gotourl=http%3A%2F%2Fwww.opticsinfobase.org%2FDirectPDFAccess%2FD3434FEB-B711-EC3F-1C98611808A4A0EA_90297.pdf%3Fda%3D1%26id%3D90297%26seq%3D0%26mobile%3Dno&org=>>.
- [13] FÜLÖP, J.A., et al. Design of high-energy terahertz sources based on optical rectification. In *Optics express* [online]. Hungary, Pécs : [s.n.], 2010 [cit. 2011-03-23]. Dostupné z WWW:
<http://www.opticsinfobase.org/view_article.cfm?gotourl=http%3A%2F%2Fwww.opticsinfobase.org%2FDirectPDFAccess%2FD38A7EB0-FE28-EA6E-D854C6FE5DE057E4_199762.pdf%3Fda%3D1%26id%3D199762%26seq%3D0%26mobile%3Dno&org=>>.
- [14] HOFFMANN, Matthias C., et al. Efficient terahertz generation by optical rectification at 1035 nm. In *Optics Express* [online]. Massachusetts : [s.n.], 2007 [cit. 2011-03-23]. Dostupné z WWW:
<http://www.opticsinfobase.org/view_article.cfm?gotourl=http%3A%2F%2Fwww.opticsinfobase.org%2FDirectPDFAccess%2FD3B7EFF0-C85E-52E8-B46491A139FC8E2B_141090.pdf%3Fda%3D1%26id%3D141090%26seq%3D0%26mobile%3Dno&org=>>.
- [15] *Photonics Innovation Centre* [online]. University of St Andrews, 2010 [cit. 2011-03-23]. Dostupné z WWW: <<http://www.st-andrews.ac.uk/~pic/PH5182/>>.

- [16] VODOPYANOV, Konstantin. *Terahertz Technologies and Applications : Handouts* [online]. Stanford University, 2008 [cit. 2011-03-23]. Dostupné z WWW: <https://ccnet.stanford.edu/cgi-bin/course.cgi?cc=ee392g&action=handout_view&V_section=general>.
- [17] FEDERICI, John, et al. THz imaging and sensing for security applications : explosives, weapons and drugs. In *Semiconductor Science and Technology*. United Kingdom : [s.n.], 2005. s. 266-280. Dostupné z WWW: <stacks.iop.org/SST/20/S266>.
- [18] KEMP, C. Michael, et al. Security applications of terahertz technology in SPIE. USA, FL, Orlando: 2003 s.44.
- [19] HUANG F., et al. Terahertz study of 1,3,5-trinitro-s-triazine (RDX) by time domain spectroscopy and FTIR, 2003, *Appl. Phys. Lett.* 83
- [20] KAWASE, Kodo, et al. Terahertz parametric sources and imaging applications. In *Semiconductor Science and Technology*. United Kingdom : [s.n.], 2005. s. 258-265. Dostupné z WWW: <stacks.iop.org/SST/20/S258>.
- [21] *Www.teraview.com* [online]. 2010 [cit. 2011-03-30]. Explosives detection technology. Dostupné z WWW: <<http://www.teraview.com/downloads/TeraViewexplosivesdetectiontechnology.pdf>>.
- [22] *Www.terasec.de* [online]. 2004 [cit. 2011-03-30]. TeraSec and the European Security Research Programme PASR. Dostupné z WWW: <http://www.terasec.de/index.php?topic=Terasec_technology.htm>.
- [23] FEDERICI, John, et al. THz standoff detection and imaging of explosives and weapons. In SPIE 5781, 75. 2005, s10. Dostupné z WWW: <http://web.njit.edu/~federici/Research/THz/THz_stand_off-invited-SPIE-6-7-2005.pdf>.
- [24] *Www.thruvision.com* [online]. 2011 [cit. 2011-03-31]. Činnost T 5000. Dostupné z WWW: <http://www.thruvision.com/Our_Products/T5000_Sub_Pages/T5000_Operation.htm>.

- [25] ŠČUREK, Radomír. *Vybrané technické prostředky detekce a pyrotechnická ochrana na letišti*. Ostrava : VŠB TU Ostrava FBI, Oddělení bezpečnosti osob a majetku KBM, 2008. 62 s.
- [26] ZHANG, X. C.; XU, Jingzhou. *Introduction to THz Wave Photonics*. London : Springer, 2010. 246 s. ISBN 978-1-4419-0977-0.
- [27] A. Dobroiu, M. Yamashita, Y. N. Ohshima, Y. Morita, C. Otani, and K. Kawase, *Appl. Opt.* 43, 5637, 2004.
- [28] SAKAI, Kiyomi. *Terahertz Optoelectronics*. Germany : Springer, 2005. 400 s.
- [29] KOMÍNEK, Aleš. *Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně : Fakulta aplikované informatiky* [online]. 2011, 9.3.2011 [cit. 2011-05-14]. Regionální výzkumné centrum CEBIA-Tech. Dostupné z WWW: <http://web.fai.utb.cz/?id=0_2_8□=cs&type=0>.
- [30] HADJILOUCAS, S.; KARATZAS, L.S.; BOWEN, J.W. Measurements of leaf water content using terahertz radiation. In *IEEE Transactions on Microwave Theory And Techniques* [online]. [s.l.] : [s.n.], 1999 [cit. 2011-04-19]. Dostupné z WWW: <<http://www.mendeley.com/research/measurements-leaf-water-content-using-terahertz-radiation/>>.
- [31] MÁLEK, Martin. Bomba, kterou se Nigerijec pokusil odpálit na lince Amsterdam-Detroit, mohla letadlo poslat k zemi. *Mediafax* [online]. 2009, 14, [cit. 2011-04-27]. Dostupný z WWW: <http://www.mediafax.cz/zahranici/2973985-Bomba-kterou-se-Nigerijec-pokusil-odpalit-na-lince-Amsterdam-Detroit-mohla-letadlo-poslat-k-zemi>.
- [32] *TeraView* [online]. 2010 [cit. 2011-05-14]. Products - TPS Spectra 3000. Dostupné z WWW: <<http://www.teraview.com/terahertz/products/terahertz-pulzed-spectra-3000/index.html>>.
- [33] *Wikipedie* [online]. 2011 [cit. 2011-05-14]. Ramanův jev. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Raman%C5%AFv_jev>
- [34] doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.

- [35] *IEEE Microwave Theory and Techniques Society* [online]. 26.4.2011 [cit. 2011-05-17]. Publications - Terahertz Science and Technology. Dostupné z WWW: <<http://www.mtt.org/publications/118-terahertz.html>>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

BWO	Backward oscilator – oscilátor zpětné vlny
CT	Computer tomografy – počítačová tomografie
DFG	Diference frequency generation – generování pomocí rozdílové frekvence
EO	Elektro-optické
FASSST	Fast Scan Submillimeter Spectroscopic Technique – metoda rychlého spektroskopického snímání
FEL	Free electron laser – laser volného elektronu
HH	Heavy hole – těžká díra
IR	Infra red – infračervené
LED	Light emitting diode – světlo vyzařující dioda
LH	Light hole – lehká díra
LO	Local oscilator – lokální oscilátor
MMIC	Monolithic microwave integrated circuit – monolitický integrovaný mikrovlnný obvod
MMW	Milimeter wave – milimetrová vlna
MRI	Magnetic resonance imaging – zobrazování magnetickou resonancí
OPA	Optical parametric amplification – optické parametrické zesílení
OR	Optická rektifikace
PC	Photo conductive – foto-elektricky vodivé
QCL	Quantum cascade laser – Kvantový kaskádový laser
TDS	Time domain spectroscopy – časově závislá spektroskopie
TPO	Terahertzový parametrický oscilátor

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Rozdělení spektra elektromagnetického záření [1].....	12
Obr. 2 Rozdělení THz zdrojů [2]	14
Obr. 3 Rozdělení THz zdrojů [2]	15
Obr. 4 Rozdělení THz zdrojů [2]	16
Obr. 5 Schéma principu optické rektifikace	16
Obr. 6 Grafy účinnosti THz záření získaného OR [13].....	20
Obr. 7 Graf závislosti energie THz pulzu na energii pulzu budicího laseru [14].....	21
Obr. 8 Schéma principu DFG [2]	22
Obr. 9 Fázový synchronismus v krystalu LiNbO ₃ pro OPA [2]	23
Obr. 10 Gunn dioda – VA charakteristika, konvertor [2].....	24
Obr. 11 Triplikátor s obvodem Schottkyho diody, Schottkyho dioda [2]	25
Obr. 12 Fotoelektrický spínač [2].....	26
Obr. 13 Nákres modelu PC antény [15].....	27
Obr. 14 Schematické znázornění principu PC antény [2]	28
Obr. 15 Struktury elektrod PC antén [2]	28
Obr. 16 a) Princip fotoelektrického směšování, b) Detail logaritmické spirálové antény [2]	30
Obr. 17 a) PC anténní dipól, b) Graf závislosti výstupního výkonu na frekvenci pro PC anténu [2]	31
Obr. 18 PC anténa s dvojitým dipólem [2].....	32
Obr. 19 Schéma THz zdroje - urychlovač částic [2]	33
Obr. 20 Schéma konstrukce BWO [2].....	34
Obr. 21 Schéma principu BWO [16]	35
Obr. 22 Princip FEL [16]	36
Obr. 23 Blokové schéma principu FEL [15]	36
Obr. 24 Schéma principu laseru, konstrukce [2]	38
Obr. 25 Schéma energií populační inverze v p-typ Ge [2]	39
Obr. 26 Konstrukce p-typ Ge THz laseru [2]	40
Obr. 27 Rozdíl mezi běžným a kvantovým kaskádovým laserem [15]	41
Obr. 28 Schéma principu kvantového kaskádového laseru [2]	42
Obr. 29 Přehled metod koherentní THz detekce [2]	44

Obr. 30 Schéma elektro-optického vzorkování ve volném prostoru [2]	46
Obr. 31 ZnTe <110> orientovaný krystal [2].....	47
Obr. 32 PC anténní přijmač [2]	48
Obr. 33 Schéma heterodynního detektoru [2].....	49
Obr. 34 Schéma bolometru [2].....	52
Obr. 35 Zapojení bolometru do Wheatsonova můstku [2]	53
Obr. 36 Vlnovod s Winstonovými koncentrátory [2].....	54
Obr. 37 Struktura pyroelektrického detektoru [2]	55
Obr. 38 Schéma Golayova článku [2].....	56
Obr. 39 a) Parabolické zrcadlo, b) čočka [2]	58
Obr. 40 a) jednovrstvá, b) dvouvrstvá antireflexní povrchová úprava [2].....	58
Obr. 41 Pásmový filtr [2]	59
Obr. 42 Technologie detekce výbušnin, zbraní a drog od Teraview [21].....	64
Obr. 43 a) THz spektrální absorpční charakteristiky výbušnin, b) Srovnání THz absorpčního spektra výbušniny RDX a C4 od dvou různých skupin [17]	66
Obr. 44 Absorpční spektra drog a jejich rozlišení [20]	67
Obr. 45 Vzdálená pasivní detekce [22].....	68
Obr. 46 Schéma principu vzdálené aktivní detekce [23].....	69
Obr. 47 Rentgenované zavazadlo, vpravo s barevným rozlišením dle hustoty obsahu [25]	72
Obr. 48 Závislost prostupnosti THz záření na frekvenci [2].....	74
Obr. 49 Schéma přenosového pulzního THz zobrazování [2]	75
Obr. 50 Schéma 2-D zobrazování v reálném čase [2].....	76
Obr. 51 Schéma reflexní tomografie [2]	78
Obr. 52 Schéma počítačové tomografie [2]	78
Obr. 53 Schéma difrakční tomografie [2]	79
Obr. 54 Schéma rastrového snímání [2].....	80
Obr. 55 Srovnání zobrazovacích systémů [2].....	81
Obr. 56 a) fotografický, b) THz – obraz žiletky z části překryté černým polyetylenem [2].....	82
Obr. 57 Schéma měření THz vlny za použití rozmítaného snímacího signálu [26]	85
Obr. 58 Schéma časově závislé rozdílové spektroskopie [26]	86

Obr. 59 TeraView TPS spectra 3000 [32].....	87
Obr. 60 Připravené vzorky pro spektroskopické měření: vlevo list marihuany odrůdy bílá vdova, vpravo list kopřivy dvoudomé.....	93

SEZNAM TABULEK

Tab 1 THz frekvence získané z plynového laseru [2].....	38
---	----

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Tabulka výbušnin a drog s jejich charakteristickými frekvencemi pohlcení v THz oblasti [17]	108
Příloha P II: pracovní činnost T 5000 [24]	109

**PŘÍLOHA P I: TABULKA VÝBUŠNIN A DROG S JEJICH
CHARAKTERISTICKÝMI FREKVENCEMI POHLCENÍ V THZ
OBLASTI [17]**

Výbušniny	Střední hodnota charakteristických frekvencí [THz]
Semtex-H	0.72, 1.29, 1.73, 1.88, 2.15, 2.45, 2.57
PE4	0.72, 1.29, 1.73, 1.94, 2.21, 2.48, 2.69
RDX / C4	0.72, 1.26, 1.73
PETN - a	1.73, 2.51
PETN - b	2.01,
HMX - a	1.58, 1.91, 2.21, 2.57
HMX - b	1.84,
TNT - a	1.44, 1.91
TNT - b	1.7,
TNT	5.6, 8.2, 9.1, 9.9
NH ₄ NO ₃	4.7,

Drogy

Metamfetamin	1.2, 1.7-1.8
MDMA	1.4, 1.8
α-monohydrát laktózy	0.54, 1.20, 1.38, 1.82, 2.54, 2.87, 3.29
moučkový cukr	1.44, 1.61, 1.82, 2.24, 2.57, 2.84, 3.44
Ko-kodamol	1.85, 2.09, 2.93
Aspirin - rozpustný	1.38, 3.26
Aspirin - kapsle	1.4, 2.24
Acetaminofen	6.5,
Terfenadin	3.2,
Naproxen sodík	5.2, 6.5

a - vzorky byly připraveny jako tablety za využití spektroskopického polyetylenů
b - vzorky byly objednány jako lisované tablety od Accurate Energetics LLC.
všechny materiály jsou v citlivé formě - bez obsahu vody

PŘÍLOHA P II: PRACOVNÍ ČINNOST T 5000 [24]

Obraz 1 odpovídá vzdálenosti snímané osoby ve 25m, obraz 2 ve 20m a obraz 3 v 10m.

A-F jsou různé úrovně kontrastu pro lepší rozpoznání za různých klimatických podmínek.

