

Návrh optických prvků pro spektrometr milimetrových vln

The Design of Optical Components for a Millimeter-Wave
Spectrometer

Ondřej Juríček



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta aplikované informatiky

akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Ondřej JURÍČEK
Osobní číslo: A10554
Studijní program: B3902 Inženýrská informatika
Studijní obor: Bezpečnostní technologie, systémy a management
Forma studia: prezenční

Téma práce: Návrh optických prvků pro spektrometr
milimetrových vln

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se se základními poznatky o elektromagnetickém záření a jeho interakci s materiály.
2. Seznamte se se základními konstrukčními principy uvažovaných optických členů (koutový odražeč, refrakční člen).
3. Navrhněte a zkonstruuje uvažované optické prvky (koutový odražeč, refrakční člen).
4. Proměřte parametry zkonstruovaných optických prvků.
5. Provedte úvodní experimenty a navrhněte další pokračování prací.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. GORDY, Walter and Robert L COOK. Microwave molecular spectra [online]. Chichester: Wiley, 1984 ISBN 978-0-471-08681-9. Dostupné z: http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=1303
2. LÁČÍK, Jaroslav, Zbyněk LUKEŠ a Zbyněk RAID. On Using Ray-Launching Method for Modeling Rotational Spectrometer. June 2008, vol. 17, no. 2, s. 98-107. ISSN 1210-2512
3. PIKSA, Petr, Stanislav ZVANOVEC a Petr CERNÝ. Elliptic and Hyperbolic Dielectric Lens Antennas in mm-Waves. 2011, č. 1.
4. HANSEN, H. J. Standoff Detection Using Millimeter and Submillimeter Wave Spectroscopy. Proceedings of the IEEE. August 2007, vol. 95, no. 8, s. 1691-1704. ISSN 0018-9219
5. HIEBEL, Michael. Fundamentals of vector network analysis. München: Rhode, 2007, 419 s. ISBN 978-3-939837-06-0

Vedoucí bakalářské práce:

doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.

Ústav elektroniky a měření

Datum zadání bakalářské práce:

25. února 2013

Termín odevzdání bakalářské práce:

30. května 2013

Ve Zlíně dne 25. února 2013


prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan




doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Bakalářská práce se bude věnovat návrhu optických prvků (koutový odražeč, refrakční člen) pro spektrometr, určený k měření rotačních spekter jednoduchých molekul. Teoretická část se bude zabývat konstrukcí spektrometru, interakcí elektromagnetického záření s materiály a základními konstrukčními principy uvažovaných optických členů. V praktické části se práce bude zabývat reálnou konstrukcí minimálně 2 optických prvků (koutový odražeč, refrakční člen) a proměření jejich parametrů. Závěrem bude pojednáno o využití zkonstruovaných prvků pro milimetrový spektrometr a jeho aplikace pro detekci výbušnin.

Klíčová slova: spektrum, mikrovlny, optika, rotace, frekvence, absorpce, odraz

ABSTRACT

This thesis will focus on design of optical elements (cube-corner reflector, refractive part) for a spectrometer designed to measure the rotational spectrum of simple molecules. The theoretical part will deal with the construction of the spectrometer, the interaction of electromagnetic radiation with materials and basic design principles of considered optical part's. In the practical part of the thesis will deal with the real structure at least two optical elements (cube-corner reflector, refractive part) and measuring their parameters. At the end we will discuss about the use of engineered components for millimeter spectrometer and its application for the detection of explosives.

Keywords: spectrum, microwave, optics, rotation, frequency, absorption, reflection

Rád bych poděkoval vedoucímu mé práce doc. RNDr. Vojtěchu Křesálkovi CSc. za odborné vedení, rady, pomoc se zkoumáním dané problematiky a za projevenou důvěru při používání drahých zařízení. Dále bych rád poděkoval své rodině, která mě psychicky i finančně podporovala po celou dobu studia a také mi pomohla s konstrukcí optických prvků.

„Pouze dvě věci jsou nekonečné. Vesmír a lidská hloupost, u té první si tím však nejsem tak jist“

Albert Einstein

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním 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 bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk 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 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 – 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 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 bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem 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 bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné

Ve Zlíně

.....

podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČÁST.....	10
1 ELEKTROMAGNETICKÉ ZÁŘENÍ A JEHO INTERACE S MATERIÁLEM	11
1.1 ELEKTROMAGNETICKÉ VLNY	11
1.2 DĚLENÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO ZÁŘENÍ.....	12
1.2.1 Rádiové vlny	13
1.2.2 Mikrovlny.....	13
1.2.3 Infračervené záření.....	13
1.2.4 Viditelné světlo	14
1.2.5 Ultrafialové záření.....	15
1.2.6 Roentgenové záření	15
1.3 INTERAKCE ELEKTROMAGNETICKÉHO ZÁŘENÍ S MATERIÁLY	16
1.3.1 Absorpce	16
1.3.2 Rotační spektra.....	16
1.3.3 Rotačně vibrační spektra	17
1.3.4 Elektronová spektra.....	17
1.3.5 Comptonův jev	17
1.3.6 Fotoelektrický efekt	18
2 ZÁKLADNÍ KONSTRUKČNÍ PRINCIPY UVAŽOVANÝCH OPTICKÝCH PRVKŮ	20
2.1 KOUTOVÝ ODRAŽEČ	20
2.2 REFRAKČNÍ ČLEN	21
3 SPEKTROMETRIE MILIMETROVÝCH VLN.....	24
3.1 ROTAČNÍ SPEKTROSKOPIE	24
3.2 SPEKTROMETR ROTAČNÍCH PŘECHODŮ MOLEKUL	25
3.2.1 Vektorový obvodový analyzátor R&S ZVA 67	25
3.2.2 Násobiče frekvence ZVA – Z220 TX/TR	27
II PRAKTICKÁ ČÁST	28
4 NÁVRH A KONSTRUKCE OPTICKÝCH PRVKU	29
4.1 NÁVRH, KONSTRUKCE A PROMĚŘENÍ VLASTNOSTÍ KOUTOVÉHO ODRAŽEČE	30
4.1.1 Návrh koutového odražeče.....	30
4.1.2 Konstrukce koutového odražeče	31
4.1.3 Proměření vlastností koutového odražeče.....	32
4.2 NÁVRH, KONSTRUKCE A PROMĚŘENÍ VLASTNOSTÍ REFRAKČNÍHO ČLENU.....	35
4.2.1 Návrh refrakčního členu.....	35
4.2.2 Konstrukce refrakčního členu	36
4.2.3 Proměření vlastností refrakčního členu.....	37
5 ÚVODNÍ MĚŘENÍ A NÁVRH DALŠÍHO POKRAČOVÁNÍ PRACÍ.....	40
5.1 ÚVODNÍ MĚŘENÍ.....	40
5.2 NÁVRH DALŠÍHO POKRAČOVÁNÍ PRÁCE	43
ZÁVĚR	44
ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ.....	46

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	48
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	50
SEZNAM OBRÁZKŮ	51
SEZNAM PŘÍLOH.....	53

ÚVOD

Spektroskopie rotačních přechodů jednoduchých molekul je nástrojem, pomocí kterého lze analyzovat a detekovat jednoduché molekuly plynů. V práci se budu zabývat spektroskopií milimetrových vln, která bude směřovat ke konstrukci spektrometru rotačních přechodů, určeného k detekci nebezpečných látek. Bude popsáno samotné elektromagnetické záření a různé druhy interakcí s materiály. Elektromagnetické záření musí být usměrněno do požadovaného místa, čehož lze docílit optickými prvky. Z tohoto důvodu se budu zabývat jejich konstrukčními principy. Dále budou také popsány přístroje, především vektorový obvodový analyzátor, jež budou využity pro měření. V praktické části mé práce budou navrženy konkrétní optické prvky. Bude se jednat o koutový odražeč a refrakční člen. Refrakční člen bude sloužit k zaostření signálu do ohniskové vzdálenosti a koutový odražeč bude sloužit k odrazu elektromagnetického záření. Tyto prvky budou následně zkonstruovány. Dalším krokem bude proměření, zda-li jsou zkonstruovány správně a pracují tak, jak mají. Dále také provedu úvodní měření směřované k zjištění vlastností spojovacího materiálu. Závěrem bude pojednáno o návrhu dalšího pokračování práce.

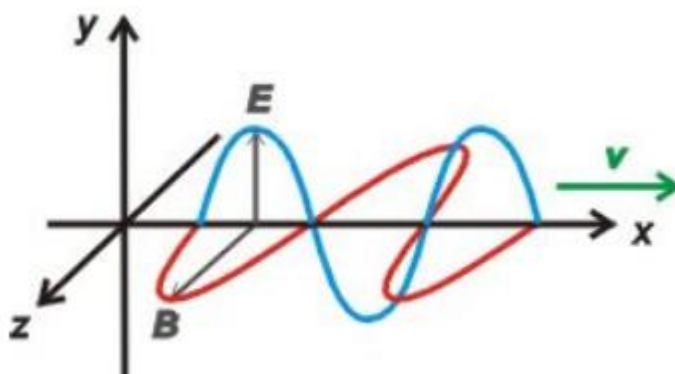
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ELEKTROMAGNETICKÉ ZÁŘENÍ A JEHO INTERACE S MATERIÁLEM

Podstatu elektromagnetického (EM) záření popsal ve druhé polovině 19. století skotský fyzik James Clerk Maxwell. Elektromagnetické záření je děj, při kterém dochází k vzájemné přeměně elektrické a magnetické složky pole. Kolem částic s nábojem, které se pohybují s určitým zrychlením, se vytváří proměnné pole magnetické. Jako zdroj EM záření se používají oscilátory. [6]

1.1 Elektromagnetické vlny

Elektromagnetické záření se skládá ze dvou složek - elektrické a magnetické. Tyto složky jsou vzájemně kolmé a současně jsou také kolmé na směr šíření. To znamená, že každé EM pole je příčné vlnění. Vektor elektrické složky elektromagnetického pole označujeme jako **E** a vektor magnetické indukce jako **B**. Obě dvě složky jsou vzájemně neoddělitelné. [6], [7]



Obr. 1: Elektromagnetická vlna. [6]

Rovinnou vlnu postupující ve směru osy x lze popsat harmonickými funkcemi:

$$E = E_M \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) = E_M \sin \omega\left(\frac{x}{v}\right), \quad (1)$$

$$B = B_M \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) = B_M \sin \omega\left(\frac{x}{v}\right), \quad (2)$$

Rychlost, kterou se EM záření šíří, je závislá na prostředí:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu}}, \quad (3)$$

, kde ε je permitivita a μ je permeabilita prostředí.

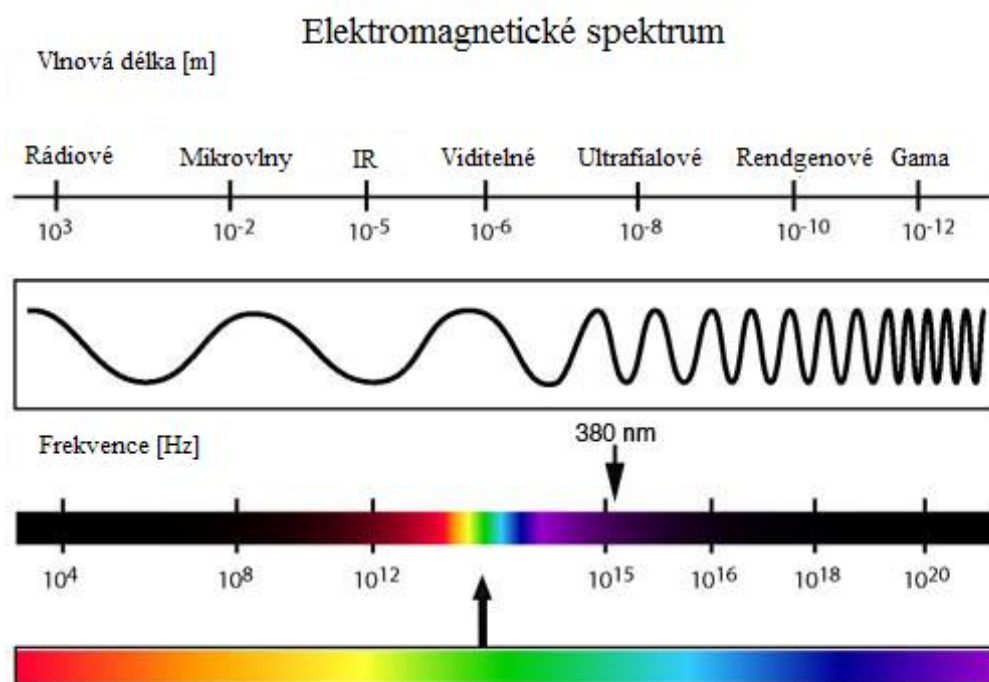
Z toho vyplývá, že se elektromagnetické záření ve vakuu šíří rychlostí:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}, \quad (4)$$

Tato rychlost je maximální definovaná rychlost pro přenos signálu nebo informace a jeho přesná hodnota je $c = 299792458 \text{ m.s}^{-1}$. [6]

1.2 Dělení elektromagnetického záření

Spektrum EM záření je rozděleno podle vlnové délky, respektive frekvence. Hranice pásem elektromagnetického záření nejsou pevně definovány a přechází pozvolně jeden v druhý, nebo se překrývají. Název pásma byl většinou zvolen na základě vlnové délky nebo podle jeho původu. [8]



Obr. 2: Elektromagnetické spektrum.

Přepočet mezi frekvencí a vlnovou délkou lze provést pomocí jednoduchého vzorce:

$$f = \frac{c}{\lambda}, \quad (5)$$

1.2.1 Rádiové vlny

Rádiové vlny jsou v rozmezí vlnové délky $\lambda = 10^3 m$ až $10^{-1} m$. Používají se především pro přenos informací (radiové vysílání, televize atd.). Vlnění se do prostoru dostává anténou, která funguje jako impedanční přizpůsobení.

Rádiové vlny, se podle své vlnové délky dále dělí na:

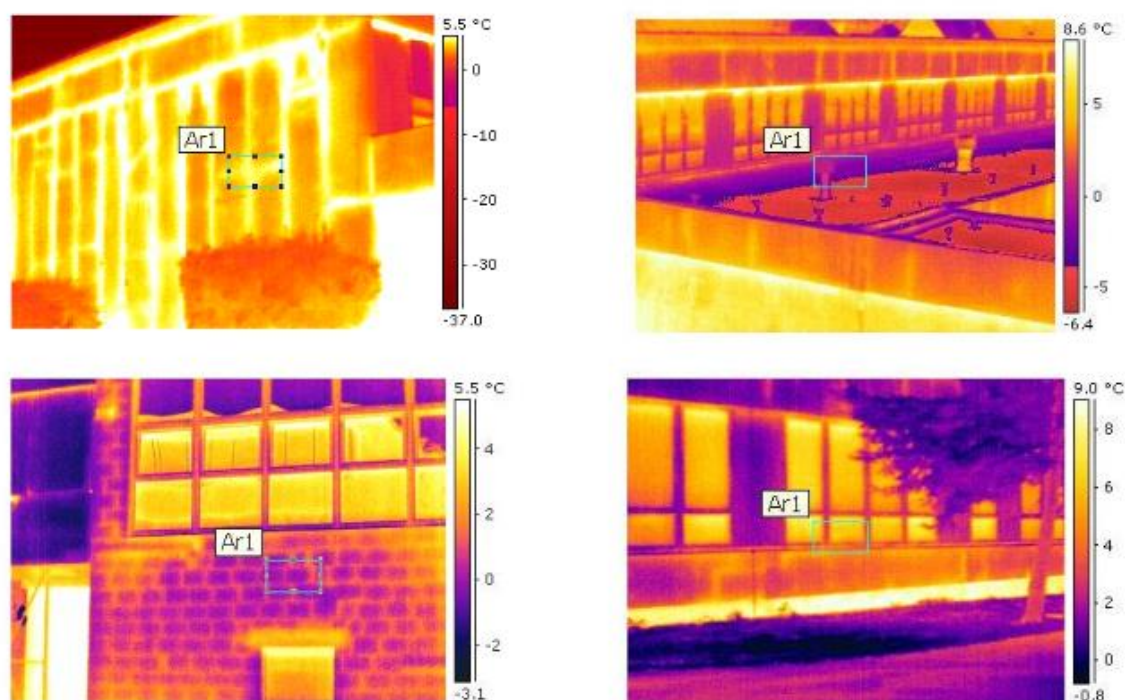
- *Dlouhé vlny* – Tyto vlny jsou v rozmezí frekvence $f = 150 - 300 \text{ kHz}$ a šíří se na velké vzdálenosti (je možno je zachytit i v údolích).
- *Střední vlny* – Tyto vlny jsou v rozmezí frekvence $f = 0,5 - 2 \text{ MHz}$.
- *Krátké vlny* – Tyto vlny jsou v rozmezí frekvence $f = 6 - 20 \text{ MHz}$. Krátké vlny se odráží od ionosféry, díky čemuž se šíří na velké vzdálenosti.
- *Velmi krátké vlny* - Tyto vlny jsou v rozmezí frekvence $f = 20 - 300 \text{ MHz}$. [8]

1.2.2 Mikrovlny

Mikrovlny mají rozmezí vlnové délky $\lambda = 10^{-1} m$ až $10^{-4} m$ což odpovídá frekvencím $f = 3 - 300 \text{ GHz}$. Tyto vlny se využívají v celé řadě technických oborů. Může se jednat o radarovou techniku (zjišťování vzdálenosti objektů), moderní komunikační technika a v mnoha dalších aplikacích. Působení mikrovln na vodu se také využívá při ohřevu pokrmů, kde se jako zdroj EM záření využívá magnetron. [6]

1.2.3 Infračervené záření

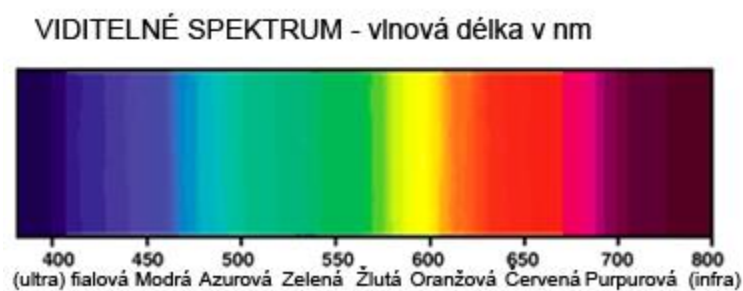
Infračervené záření (IR) bývá někdy označováno také jako tepelné záření a není viditelné lidským okem. IR záření proniká mlhou a znečištěným ovzduším. Toto záření je v rozmezí vlnové délky $\lambda = 10^{-4} m$ až $7,6 \cdot 10^{-7} m$. Pomocí vhodných přístrojů lze toto záření zachytit (IR kamery, brýle pro noční vidění apod.). Díky těmto zařízením, lze zachytit různé teploty předmětů (viz. Obr. 3). [8]



Obr. 3: Zachycené IR záření pomocí IR kamery. [8]

1.2.4 Viditelné světlo

U viditelného světla mluvíme o vlnové délce $\lambda = 7,6 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ až $3,9 \cdot 10^{-7} \text{ m}$. Barva viditelného světla závisí na vlnové délce (viz. Obr. 4). Díky světlu dokážeme rozeznávat předměty a získáváme informace o našem okolí. U světla rozeznáváme především jeho intenzitu. [8]



Obr. 4: Viditelné spektrum světla. [9]

1.2.5 Ultrafialové záření

Ultrafialové (UV) záření má vlnovou délku v intervalu $\lambda = 3,9 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ až 10^{-8} m . Zdrojem UV záření jsou tělesa, která jsou zahřátá na velmi vysokou teplotu (hvězdy, elektrický oblouk, rtuťové výbojky apod.). Jednou z jeho vlastností je, že neprochází sklem, a proto se u výbojek používá sklo křemíkové. [6], [8]

1.2.6 Roentgenové záření

Roentgenové záření se pohybuje ve vlnových délkách $\lambda = 10^{-8} \text{ m}$ až 10^{-12} m . Používá se například v medicíně (viz *Obr. 5*). Záření delších vlnových délek, je nazýváno jako měkké záření. Naopak u krátkých vlnových délek jej nazýváme jako tvrdé záření, které představuje pro lidský organismus nebezpečí. Toto záření vzniká ve speciálních elektronkách. Roentgenové záření pak můžeme rozdělit na dva typy – brzdné záření a charakteristické roentgenové záření. Brzdné záření vzniká, pokud je svazek elektronů, který dopadá na pevnou látku, zbrzděn. Charakteristické záření vzniká tak, že dopadlý elektron, který má dostatečnou kinetickou energii, vyrazí z vnitřního obalu atomu látky elektron. [8]



Obr. 5: Roentgen ruky. [10]

1.3 Interakce elektromagnetického záření s materiály

Jednou skupinou interakcí EM záření s materiálem je taková interakce, u které dochází k výměně energie mezi látkou a zářením. Při průchodu záření hmotným prostředím nastává jeho absorpce, jejíž opačný proces se nazývá emise (vyzáření). Proces, při kterém záření interaguje s látkami tak, že se rozptyluje nebo odráží a přitom se mění jeho vlnová délka, označujeme jako nepružný rozptyl. V dalším případě může látka ovlivňovat procházející záření, aniž by docházelo k výměně energie. Tento jev se nazývá pružný rozptyl a do této skupiny můžeme zařadit například měření indexu lomu (refraktometrie a interferometrie). Při širokém rozsahu energií, ve kterém lze měřit, můžeme nalézt nejrůznější přechody částic mezi odlišnými energetickými stavy z hlediska uspořádání elektronů, vibrace a rotace molekul, spinů jader a elektronů a získat tak podrobné informace o jejich chemickém složení a struktuře. [17]

U ionizujícího záření se interakce záření s hmotou dělí například na Comptonův jev nebo fotoelektrický jev.

1.3.1 Absorpce

Pokud molekula absorbuje foton, tak se její celková energie zvýší, čímž přechází do excitovaného stavu. Rozdíl mezi energetickou hodnotou molekuly v excitovaném stavu a molekulou se základní energetickou hodnotou musí být roven přijatému kvantu záření. Absorpce se projeví ve změně vnitřního rozložení náboje molekuly.

Pokud dochází k absorpci EM záření, je změna stavu molekuly ze základního stavu do stavu excitovaného doprovázeno změnou vibračního i rotačního stavu. Počet energeticky blízkých možných elektronových přechodů je u molekul velký. Z toho vyplývá, že ve výsledném spektru nerozlišujeme jednotlivé rotační a vibrační čáry, ale nahlížíme na ně jako na pásy. Tyto pásy jsou u každé molekuly typické na jiných frekvencích. [17]

1.3.2 Rotační spektra

Tato spektra jsou ze všech molekulových spekter nejjednodušší. Rotační spektra odpovídají pouze přechodům sousedních rotačních stavů. Tato spektra lze zaznamenat pouze u molekul, které mají permanentní dipól. Naměřená spektra jsou čárového charakteru. Jednotlivé čáry jsou od sebe vzdáleny o konstantní rozdíl vlnové délky. [17]

1.3.3 Rotačně vibrační spektra

Důležitou roli hraje pro aktivitu vibrací symetrie molekuly. Rotačně vibrační spektra jsou pásová, protože změna vibračního stavu je doprovázena i změnou stavu rotačního. Energie vibrací je závislá na hmotnosti vázaných atomů v molekule a pevnosti vazby. Vibrace se dělí na dva druhy:

- a) Valenční – mění se délka vazby (vzdálenost jader).
- b) Deformační – mění se vazebný úhel, ale vzdálenost jader zůstává stejná.

Čistě vibrační přechody lze získat pouze za předpokladu, že molekula nemůže rotovat. Jedná se především o pevné skupenství látek, kde rotační stupně molekuly přechází na vibrační pohyby v mřížce.

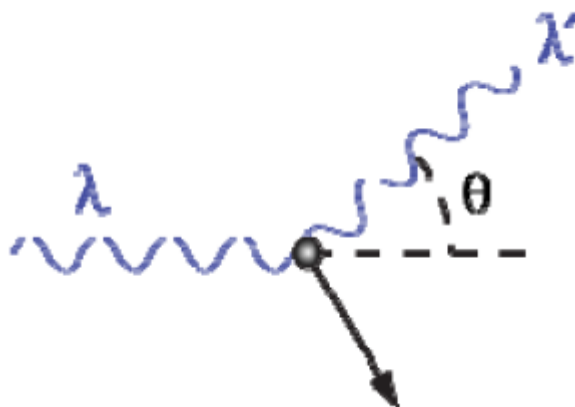
Absorbovat lze pouze EM záření, které má energii odpovídající energii příslušných vibračních a rotačních přechodů, které jsou pro různé skupiny atomů odlišné. [17]

1.3.4 Elektronová spektra

Tato spektra jsou nejsložitější, protože jsou složena ze širokých pásů, které odpovídají přechodům elektronů z vazebných orbitalů σ a π do protivazebných σ^* a π^* . Elektronová spektra jsou charakteristická u EM záření, jehož vlnová délka odpovídá 20 až 750nm. Široké spektrální pásy jsou dány přechodem elektronu mezi vazebnými a protivazebnými orbitály, přičemž přechod je doprovázen změnou rotačních a vibračních stavů molekuly. Jedinému přechodu elektronu odpovídá hned několik čar, které odpovídají změnám rotace a vibrace. Tyto přechody mezi elektronovými stavy jsou energeticky mnohem více náročné než přechody mezi vibračními a rotačními elektronovými stavy. Absorpce je potom pásová, protože při jejím zaznamenávání jednotlivé přechody splývají. [17]

1.3.5 Comptonův jev

Comptonův jev popisuje fyzikální jev, u něhož dochází ke srážce EM záření s atomy pevné látky nebo jejich elektrony. Důsledkem toho je změna vlnové délky z důvodu předání části jeho energie. Při průchodu záření s vysokou energií (jednotky keV) prostředím, ve kterém se nachází lehké atomy (atomy s malým protonovým číslem) dochází ke vzniku Comptonova jevu. V podstatě se jedná o typ absorpce, u které naráží foton (např. Roentgenové záření) na elektron, který uvolní z jeho dráhy a sám ztratí část své energie (viz Obr. 6). [11]



Obr. 6: Schéma podstaty Comptonova jevu. [11]

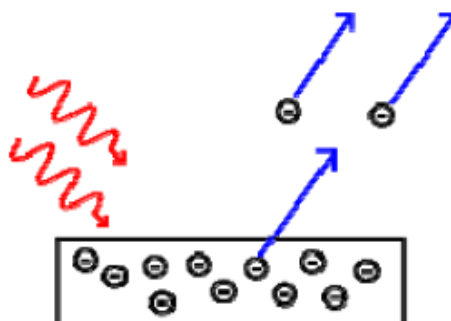
Matematicky se tento jev popisuje pomocí tzv. *Comptonovi rovnice*:

$$\Delta\lambda = (\lambda' - \lambda) = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta) \quad (6)$$

, kde $\Delta\lambda$ je posun vlnové délky, h je Planckova konstanta, m_e je hmotnost elektronu a θ je úhel mezi směrem dopadajícího a rozptýleného záření. [11]

1.3.6 Fotoelektrický efekt

Fotoelektrický jev, je fyzikální děj, při němž se po ozáření kovu krátkovlnným EM zářením uvolní z povrchu tohoto kovu elektrony (viz Obr. 7).



Obr. 7: Princip fotoelektrického efektu. [11]

Takto uvolňované elektrony se pak nazývají fotoelektrony a proces jejich uvolňování se označuje jako fotoelektrická emise či zkráceně fotoemise. Pokud jsou

elektrony uvolněny z povrchu kovu do okolí, mluvíme o vnějším fotoefektu. Záření také může elektrony uvolnit tak, že látku neopustí a zůstávají v ní jako vodivostní elektrony, v tom případě mluvíme o vnitřním fotoefektu.

Podle klasické fyziky by měla být elektronům předána kinetická energie dopadajícího záření. Pro každou vlnovou délku by měla existovat intenzita, při které by fotoefekt nastal, ale není tomu tak. Experimentálně bylo prokázáno, že k uvolňování elektronů dochází při jisté frekvenci dopadajícího záření a nezávisí na intenzitě, což klasická fyzika neuměla vysvětlit.

Vysvětlení přinesla kvantová fyzika, kdy Albert Einstein popsal fotoelektrický jev správně. Proto je rovnice, jež tento jev popisuje, nazvána Einsteinova rovnice fotoelektrického jevu:

$$h\nu = h\nu_0 + E_{\max} , \quad (7)$$

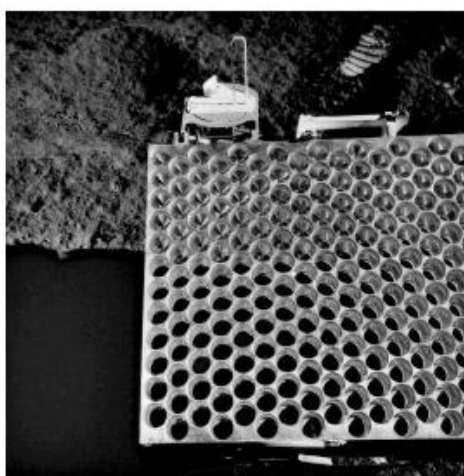
kde, $h\nu$ reprezentuje energii dopadajícího fotonu, $h\nu_0$ je výstupní práce, tedy minimální energie potřebná k uvolnění elektronu a E_{\max} je maximální možná energie uvolněného elektronu. [11]

2 ZÁKLADNÍ KONSTRUKČNÍ PRINCIPY UVAŽOVANÝCH OPTICKÝCH PRVKŮ

Optické prvky budou u spektrometru rotačních přechodů molekul sloužit k usměrnění EM záření od vysílací antény k anténě přijímací. V našem případě se bude jednat především o koutový odražeč a plankonvexní čočku.

2.1 Koutový odražeč

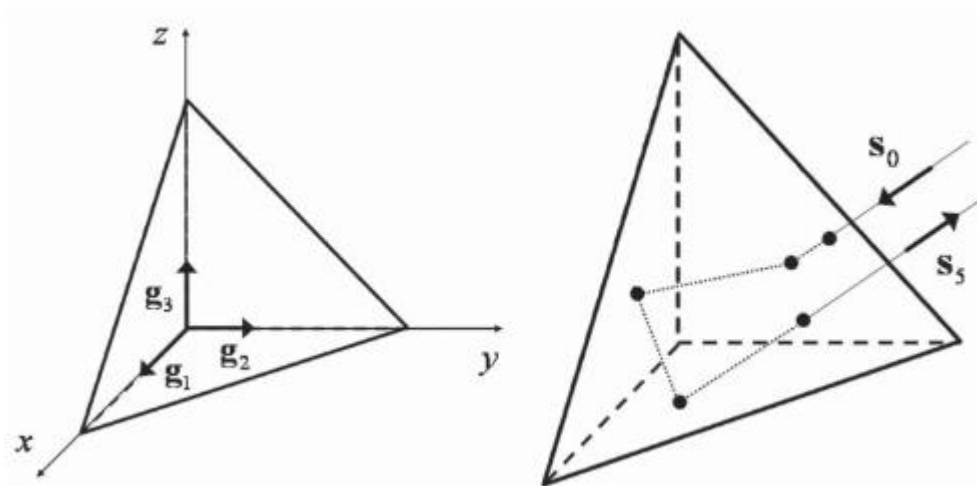
Koutový odražeč (KO) se využívá v různých odvětvích technických aplikací. Jeho základní funkcí je odraz dopadajícího EM záření zpátky do směru, ze kterého do KO vstoupil. Používá se především u optických zařízení například v geodézii. Koutový odražeč byl také umístěn na měsíci a slouží k velmi přesnému (s přesností lepší než 1cm) měření vzdálenosti Měsíce od Země (na KO se vyšle laserový paprsek a podle času, který potřebuje k návratu a jeho rychlosti se vypočítá vzdálenost, kterou uletěl). [14]



Obr. 8: Vlevo koutový odražeč umístěný na měsíci, vpravo laser, pomocí něhož se měří vzdálenost Země-Měsíc. [14]

Koutový odražeč se skládá ze tří pravoúhlých rovnoramenných trojúhelníků. V ideálním případě jsou všechny tři jeho strany na sebe kolmé. EM záření vstupuje do koutového odražeče čelní stěnou a odráží se třikrát na jednotlivých stěnách a potom vystupuje zpět čelní stěnou v přesně opačném směru (viz Obr. 9). Vystupující svazek je oproti vstupujícímu posunut o fázi π . Na rozdíl od zrcadla, u kterého musí dopadat paprsek kolmo, aby se odrazil zpět ke zdroji, pracuje KO pro relativně široký úhel zorného pole. Čelní stěna KO je ideálně větší než 10 vlnových délek signálu, který se snažíme odrazit. [12], [13]

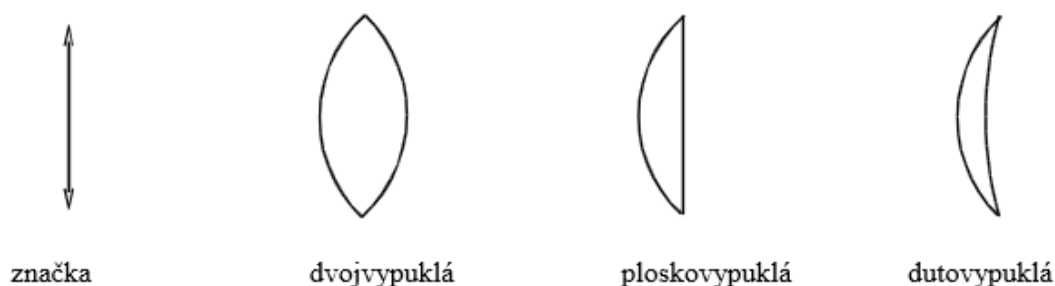
$$a = \lambda \cdot 10, \quad (8)$$



Obr. 9: Průchod paprsku koutovým odražečem. [12]

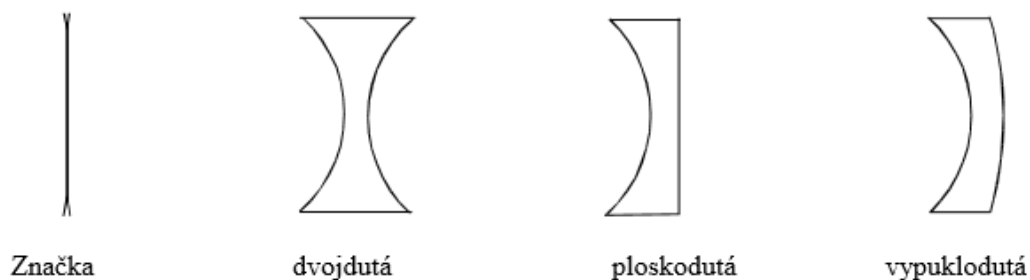
2.2 Refrakční člen

Čočky jsou využívány k zaostření svazku do ohniska, ať už se jedná o čočky dioptrické nebo čočky které jsou využívány u dalekohledů, mikroskopů či jiných optických zařízení. Jejich základní vlastností je lom svazku podle *Snellova zákona*. Čočky se dělí na dvě základní skupiny. První skupinu tvoří čočky, které mění svazek na sbíhavý, tzv. spojky (viz. Obr. 10).



Obr. 10: Čočky – spojky. [15]

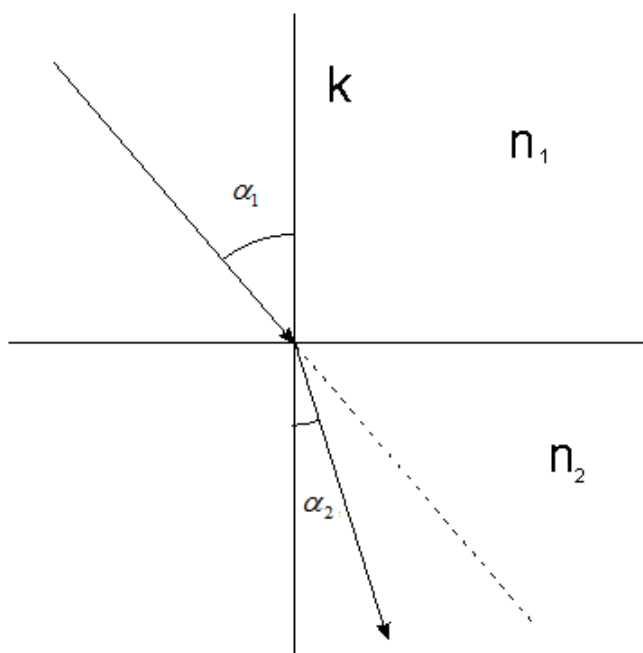
Druhou skupinu tvoří čočky, jež mění svazek na rozbíhavý, tzv. rozptylky (viz. Obr. 11).



Obr. 11: Čočky – rozptylky. [15]

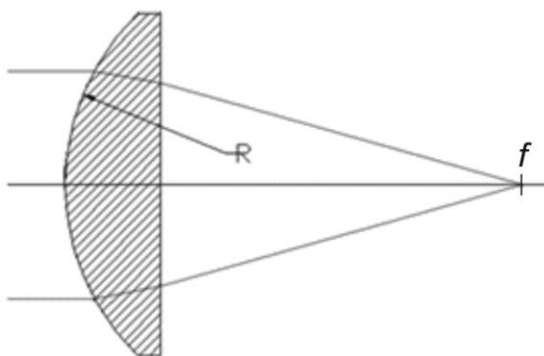
Pro určení směru šíření záření na rozhraní dvou prostředí s rozdílným indexem lomu nebo pro určení směru šíření záření nehomogenním prostředím lze uplatnit Snellův zákon. Slovní formulace *Snellova zákona* je následující: „Při šíření záření z prostředí opticky řidšího do prostředí opticky hustšího se paprsky lámou směrem ke kolmici. Při šíření záření z prostředí opticky hustšího do prostředí opticky řidšího se paprsky lámou směrem od kolmice.“ [16]

$$n_1 \cdot \sin \alpha_1 = n_2 \cdot \sin \alpha_2, \quad (9)$$



Obr. 12: Snellův zákon lomu.

Plankonvexní nebo tzv. ploskovypuklá čočka je taková čočka, jejíž jedna strana je rovinná a druhá je sférická (kulová). Tyto čočky patří do skupiny spojek a používají se v široké škále průmyslových a vědeckých aplikací. Na rozhraní dvou prostředí s rozdílnými indexy lomu dochází k lámání elektromagnetického záření. Směr, do kterého se bude svazek lámat, je určen hodnotami indexů lomu obou prostředí a také tvarem přechodu, respektive poloměru křivosti. [3]



Obr. 13: Plankonvexní čočka.

Pro výpočet poloměru křivosti vycházíme z rovnice:

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \cdot \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right), \quad (10)$$

,kde f je ohnisková vzdálenost, n_1 – index lomu prostředí, ze kterého vstupuje záření do čočky, n_2 – index lomu materiálu, z něhož je vyrobena čočka, R_1 – poloměr křivosti čočky blíže ke zdroji záření, R_2 – poloměr křivosti strany čočky vzdálenější strany od zdroje záření.

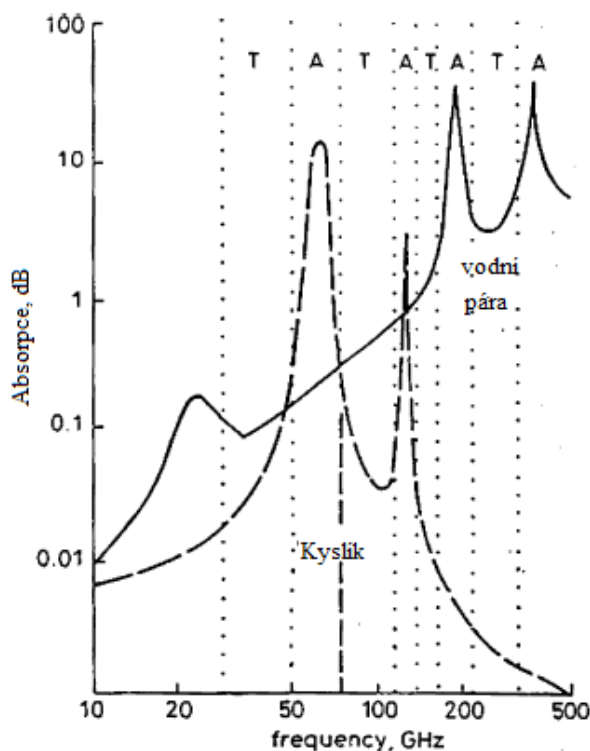
3 SPEKTROMETRIE MILIMETROVÝCH VLN

V oblasti milimetrových vln se nachází rotační a vibrační rezonance mnoha molekulárních plynů složených z uhlíku, dusíku, kyslíku a síry. Rotační spektra molekul mají potenciál využití v dálkovém snímání atmosférického znečištění a detekci plynů (potencionálních nebezpečných látek). [4]

U spektrometrie milimetrových vln se využívá jedinečných a specifických absorpčních a emisních čar chemických struktur k identifikaci materiálu. Molekulární spektroskopie je založena na trvalém vnitřním dipólovém momentu molekul a jejich interakcí s proměnným elektrickým polem, jež způsobuje přechody mezi rotačními stavy. Typická elektrická velikost rotačních přechodů je v řádech tisícovek vlnových délek. [2][1]

3.1 Rotační spektroskopie

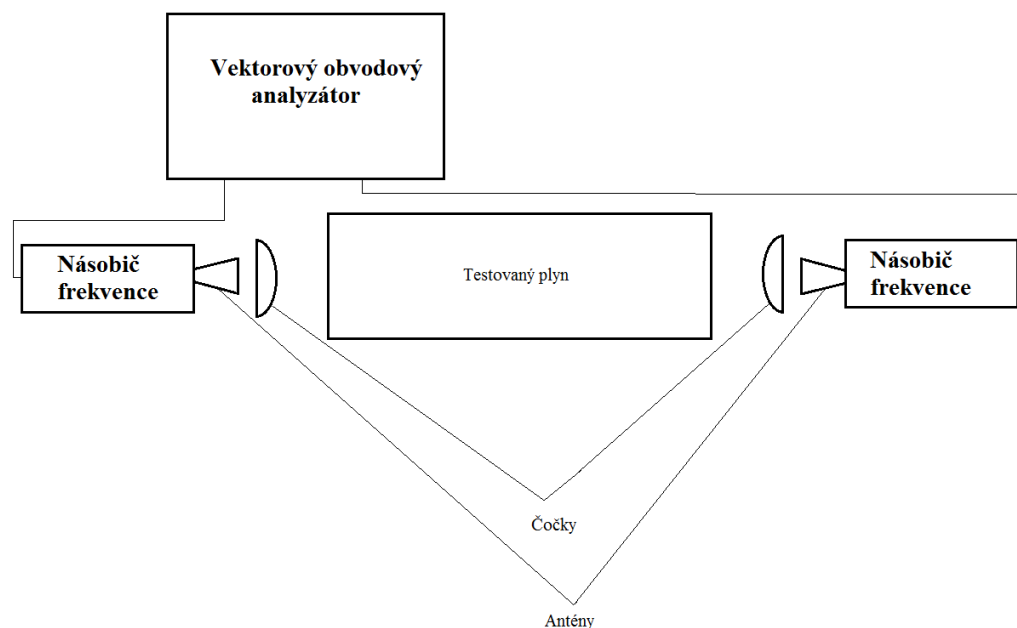
Při zkoumání frekvenčního pásma dochází na určité specifické frekvenci zkoumané molekuly k její rotaci, jež je způsobena interakcí s EM zářením. Při této rotaci dochází k absorpci EM záření. Pokud tedy měřicí sestavou měříme absorpci, dochází v dané specifické frekvenci k jejímu nárůstu (viz. Obr. 14).



Obr. 14: Absorpce EM záření kyslíkem a vodní parou.[4]

3.2 Spektrometr rotačních přechodů molekul

Spektrometr rotačních přechodů molekul je zařízení, jehož hlavním účelem je detekování molekul, jež jsou umístěny mezi anténami. Takový spektrometr můžeme popsat jednoduchým schématem dle Obr. 15.

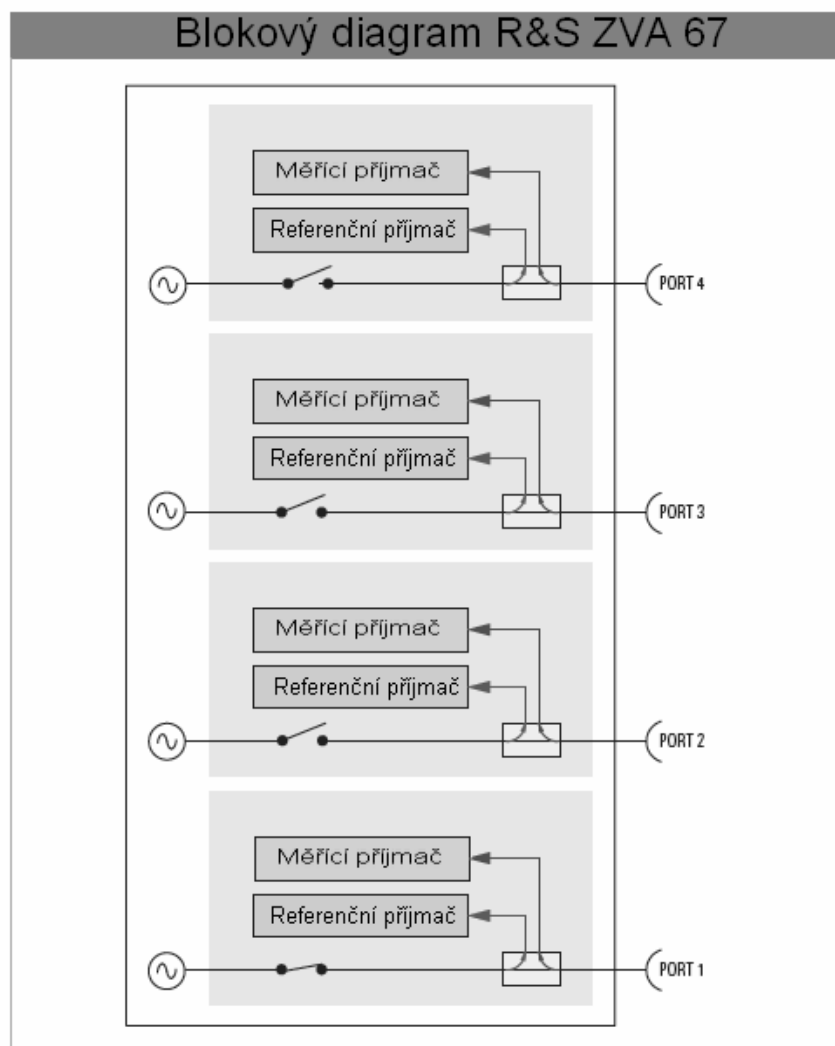


Obr. 15: Schéma spektrometru rotačních přechodů molekul.

Vektorový obvodový analyzátor (VNA) slouží jako generátor EM záření a současně jej také vyhodnocuje. Maximální frekvence, jež je schopen VNA vygenerovat, bývá omezena v řádech desítek GHz, a proto jsou použity frekvenční násobiče, které rozšiřují frekvenční pásmo. Pro impedanční přizpůsobení vlnovodu a prostředí jsou použity antény, za nimiž jsou umístěny čočky, které slouží k zaostření svazku.

3.2.1 Vektorový obvodový analyzátor R&S ZVA 67

Vektorový obvodový analyzátor, s nímž pracujeme, je od firmy Rohde&Schwarz. Jedná se o model ZVA 67, který má 4 porty. Na rozdíl od většiny 4 portových vektorových obvodových analyzátorů, které mají pouze 2 generátory (generátor bývá společný pro 2 porty), má ZVA 67 pro každý port svůj vlastní generátor. [5]



Obr. 16: Blokový diagram R&S - ZVA 67.

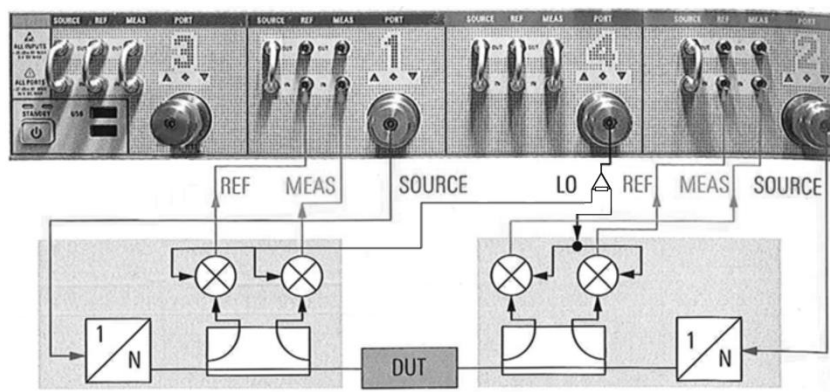
Základní parametry:

- a) měření lineárních a nelineárních zesilovačů a směšovačů,
- b) měření šumu,
- c) profil pulzu měření s rozlišením 12,5 ns,
- d) skutečný rozdíl měření pro spolehlivé charakterizace aktivních prvků s vyváženými porty,
- e) vysoký výstupní výkon typ. > 15 dBm,
- f) široký dynamický rozsah typ. > 140 dB,
- g) vysoká rychlost měření < 3,5 ms na testovacím bodu,
- h) šířky IF pásma: 01. 05. 30 MHz,
- i) univerzální kalibrační techniky: TOSM, TRL / LRL, TOM, TRM, TNA, UOSM,

- j) automatická kalibrace jednotky,
- k) fázové a skupinové měření zpoždění na mixérech s přístupem a bez přístupu LO,
- l) frekvenční rozsah: 10 MHz 67 GHz.

3.2.2 Násobiče frekvence ZVA – Z220 TX/TR

Pro měření mimo rozsah vektorového obvodového analyzátoru (v našem případě 10MHz - 67GHz) je potřeba použít rozšiřující modul - frekvenční násobič. Jedná se o nelineární prvek. Pro moje měření bude použit násobič řady R&S[®] ZVA obsahující integrovaný atenuátor (zeslabující článek) pro manuální kontrolu výstupního výkonu. Tímto způsobem jsme schopni rozšířit použitelný maximální rozsah do několika stovek GHz. Násobiče fungují na různých frekvenčních rozsazích dle jednotlivých typů a jejich konfigurací (elektromagnetické vlny se šíří v obdélníkových vlnovodech, jejichž rozměry jsou seskupeny a standardizovány). Námi použitý násobič ZVA-Z220 TX/TR rozšiřuje frekvenční rozsah na 140-220GHz. [5]

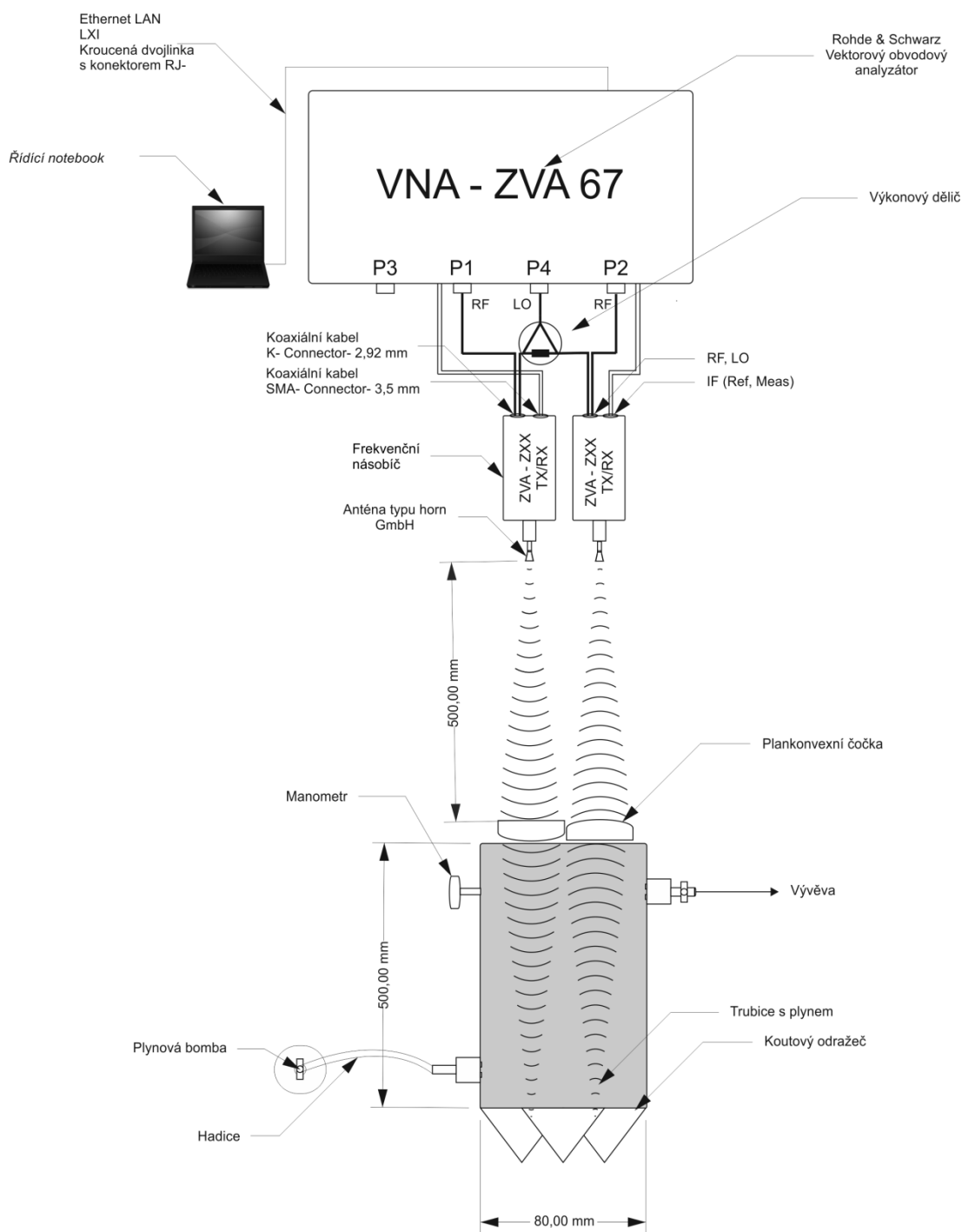


Obr. 17: Zapojení frekvenčních násobičů.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 NÁVRH A KONSTRUKCE OPTICKÝCH PRVKU

Pro návrh optických prvků jsem musel vycházet z blokového schématu spektrometru rotačních přechodů jednoduchých molekul (*Obr. 18*), jež jsem navrhl s kolegou, který se zabývá jeho konstrukcí.



Obr. 18: Blokové schéma spektrometru milimetrových vln. (Autor: Lukáš Urbančok)

Při návrhu jsem omezován vzdáleností násobičů frekvence. Tyto násobiče nelze umístit naproti sobě jako je tomu na *Obr. 15*. Koaxiální kabel, který vede signál od VNA k násobičům frekvence, musí mít stabilní vlastnosti, ale pro dosažení těchto vlastností je omezena jeho délka. Abychom byli schopni detekovat rotační přechody molekul, musí svazek procházet dostatečným množstvím plynu. Z tohoto důvodu jsem zvolil umístění násobičů respektive antén vedle sebe a zdvojnásobil jsem tím vzdálenost, kterou paprsek urazí jeho odrazem. Za anténami jsou umístěny čočky, které zaostří svazek na koutový odražeč. Abychom vysílaný svazek na konci měřicí trubice odrazili zpět do směru, ze kterého byl vyslán, bude tato trubice zakončena koutovým odražečem. Pro vhodnou konstrukci optických prvků musím tedy brát v potaz vzdálenost, na jakou jsou určeny a frekvenční rozsah, ve kterém budou pracovat.

4.1 Návrh, konstrukce a proměření vlastností koutového odražeče

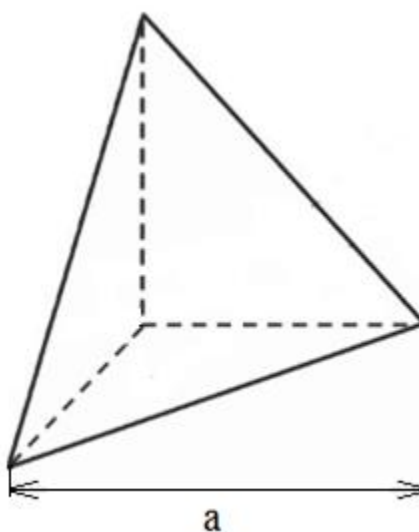
4.1.1 Návrh koutového odražeče

Koutový odražeč je navržen pro frekvenční rozsah 140-220GHz (což je rozsah použitých násobičů frekvence ZVA – Z220 firmy ROHDE&SCHWARZ). Rozměr strany koutového odražeče, jak je již zmíněno v teoretické části, musí být 10x větší než vlnová délka, pro kterou je určen, a proto jsem vycházel z nejnižší frekvence násobičů 140GHz jejíž vlnová délka je nejdelší z námi použitého rozsahu. Pro přepočty mezi frekvencí a vlnovou délkou jsem použil upravený vztah (5):

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{140 \cdot 10^9} = 2,14 \cdot 10^{-3} m \quad (11)$$

Dosadím-li tedy vlnovou délku λ do rovnice (8) dostaneme požadovanou minimální délku strany.

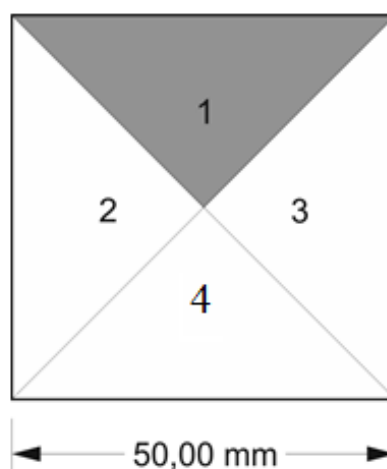
$$a = 2,14 \cdot 10^{-3} \cdot 10 = 21,4 \cdot 10^{-3} \quad (12)$$



Obr. 19: Koutový odražeč.

4.1.2 Konstrukce koutového odražeče

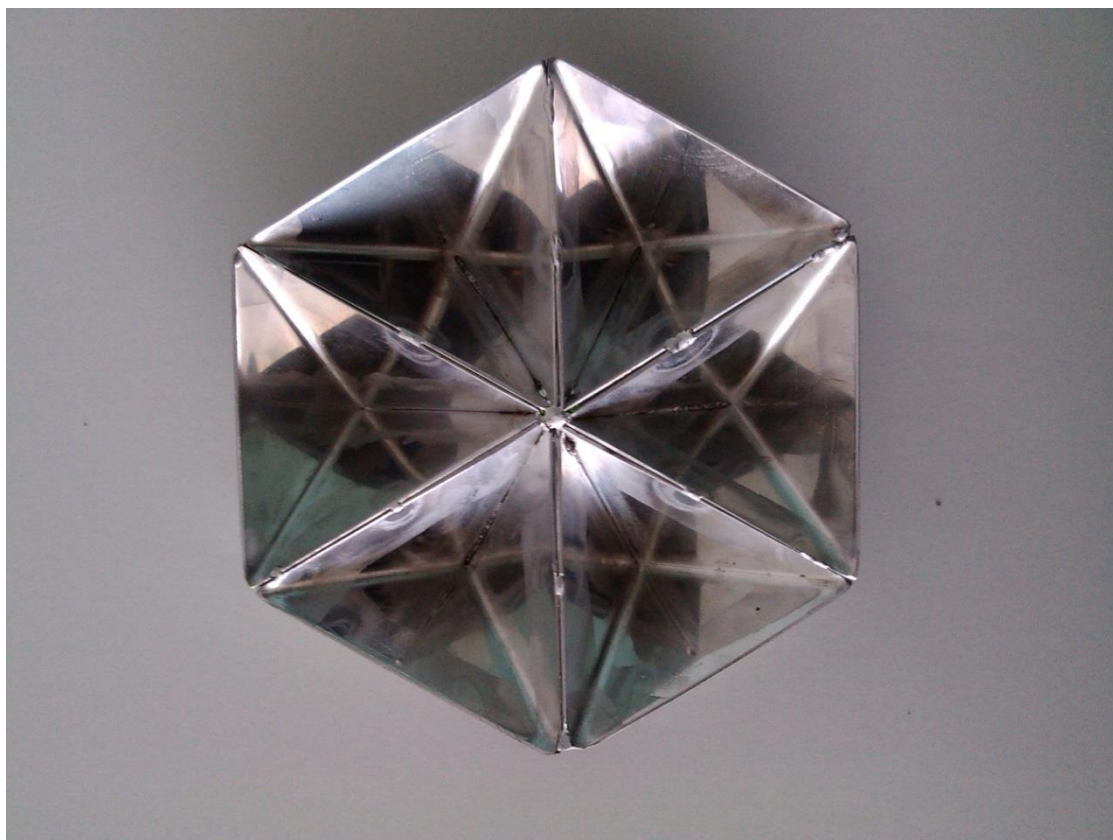
Pro fyzickou konstrukci jsem zvolil plech z nerezové oceli tloušťky 0,8 mm. Minimální délku strany a jsem vypočítal na rozměr 21,4 mm. Jelikož se můžou některé rotační přechody molekul nacházet i na kratších vlnových délkách, zvolil jsem délku strany 50 mm, a proto je možné využít koutový odražeč i pro EM záření vlnové délky 5 mm. Aby koutový odražeč zabíral celou plochu na koncové stěně trubice (jejíž vnitřní průměr je 90 mm) musí být vyrobeno minimálně 6 jednotlivých KO, jež budou spojeny. Postup konstrukce bude vycházet z Obr. 19, pomocí něhož vysvětlím jednotlivé kroky výroby.



Obr. 20: Konstrukce koutového odražeče.

Konstrukci koutového odražeče můžeme rozdělit do jednotlivých kroků:

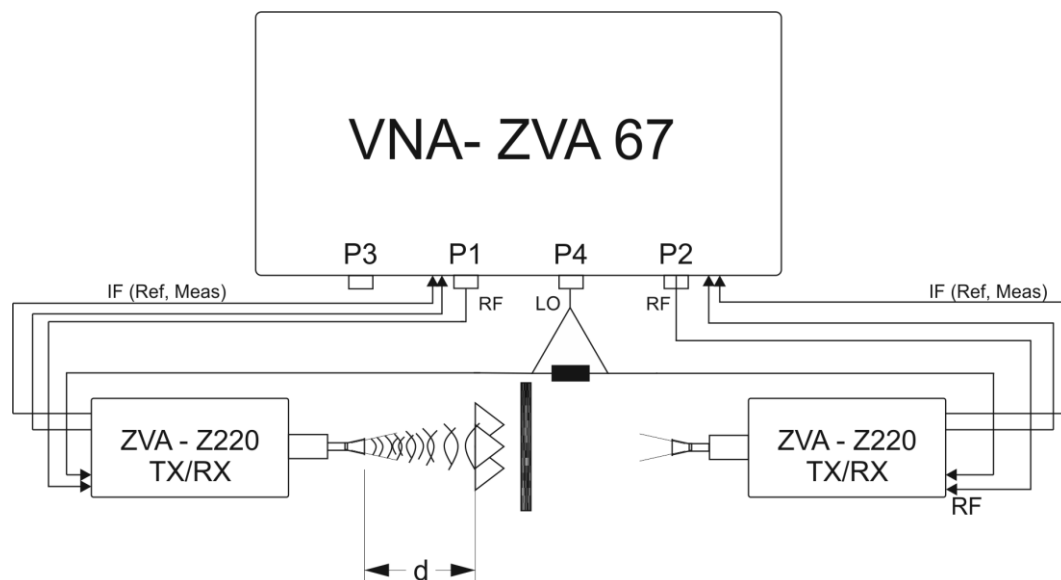
- 1) Prvním krokem při konstrukci je ustřížení čtvercového plechu strany $a = 50\text{mm}$.
- 2) Dalším krokem je vystřížení $\frac{1}{4}$ jeho plochy. (na Obr. 19 naznačena číslem 1)
- 3) Následným krokem je ohnutí pravoúhlých rovnoramenných trojúhelníků 2 a 3, které musí svírat s trojúhelníkem 4 pravý úhel, tedy 90° .
- 4) Následujícím krokem bude svaření horní hrany stěn 2 a 3.
- 5) Posledním krokem je svaření všech šesti koutových odražečů k sobě.



Obr. 21: Vyrobený koutový odražeč.

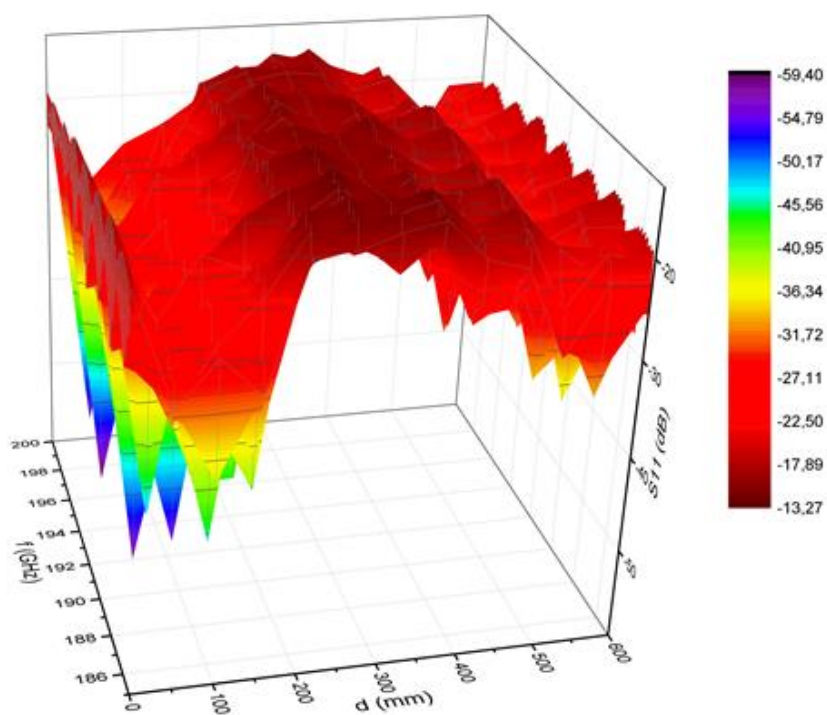
4.1.3 Proměření vlastností koutového odražeče

Jednou z vlastností koutového odražeče je, že odráží svazek do stejného směru, ze kterého vyšel, i když do něj nevstupuje kolmo. V mém případě ovšem vím, že bude koutový odražeč upevněn kolmo k dopadajícímu svazku, a proto mě zajímá především do jaké vzdálenosti lze koutový odražeč použít, aby odrážel co největší část vysílaného EM záření. Z tohoto důvodu jsem zvolil metodu měření odrazu S_{11} v závislosti na frekvenci a vzdálenosti KO od vysílací antény. Toto měření bude tedy vycházet ze schématu na Obr. 21.

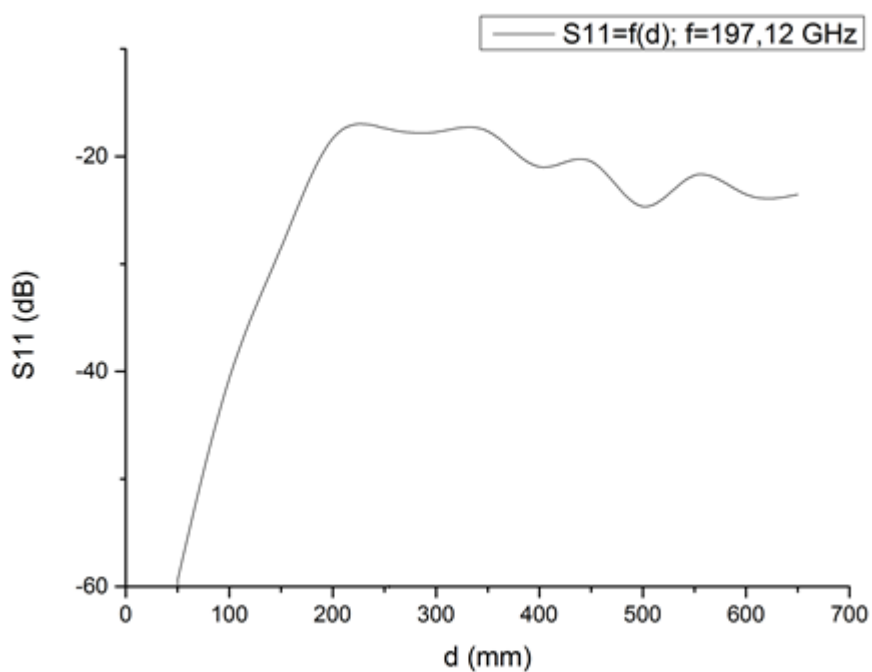


Obr. 22: Blokové schéma měření koutového odražeče s proměnlivou vzdáleností.

Při měření koutového odražeče jsem zkoumal parametr S_{11} (odraz). Měření probíhalo na frekvenčním rozsahu 185-200 GHz. Frekvence se měnila po 30 MHz, což odpovídá 501 bodům pro jedno měření. Vzdálenost koutového odražeče od vysílací antény byla proměnlivá od 0 cm (KO byl umístěn přímo na konci antény) do 60 cm s krokem 5cm. Na VNA bylo nastaveno rozlišení měření na 10 Hz, což je největší přesnost IF filtru, který lze zvolit. Vektorový obvodový analyzátor také umožňuje nastavit průměrování několika hodnot. Toto průměrování slouží k potlačení šumu. Této možnosti jsem využil a nastavil počet průměrování na hodnotu 10. Po akvizici dat jsem dostal 3D graf, který je zobrazen na *Obr. 23*. Pro přesnější popis jsem vytvořil také 2D graf (*Obr. 24*) na kterém je zobrazena závislost vzdálenosti na přenosu při frekvenci 197,12GHz.



Obr. 23: Graf odrazu KO v závislosti na frekvenci a na vzdálenosti od vysílací antény.



Obr. 24: Závislost odrazu S_{11} na vzdálenosti KO od vysílací antény na frekvenci $f=197,12\text{GHz}$.

Z grafu na *Obr. 23* lze vyčíst, že průběh grafu se s měnící se frekvencí příliš nemění. Pro podrobný popis odrazu je vhodnější využít 2D graf, na kterém je pouze závislost na jedné frekvenci. Pokud byl koutový odražeč umístěn přímo na konci antény, byl odraz maximální a to z toho důvodu, že signál neměl jinou cestu, jak se dostat pryč z koutového odražeče než zpět do antény. Když jsem ovšem koutový odražeč posunoval dál, odraz začal klesat. Tento pokles si vysvětluji tím, že se svazek odrážel na svárech a spojích odražeče a rozptýlil se do okolí. Při dalším vzdalování KO začal odraz stoupat, jelikož svazek dopadal přímo na stěny a odrážel se zpět do směru, ze kterého byl vyslán. Vysílané EM záření nebylo ničím omezováno ani zaostřováno a rozbíhalo se. Z toho plyne, že po dosažení vzdálenosti 350 mm už svazek nedopadá celou plochou na stěny odražeče, ale částečně jej obtéká, a proto začíná odraz klesat.

Z návrhu spektrometru rotačních přechodů jednoduchých molekul, který je na *Obr. 18* vyplývá, že koutový odražeč bude umístěn ve vzdálenosti 50 cm od čoček, jež budou zaostřovat svazek. Pokles odrazu S_{II} ve vzdálenosti 50 cm, od vysílací antény je oproti maximálnímu odrazu relativně malý. V našem případě jsem ovšem navrhl použití kovové trubky, ve které se bude nacházet měřený plyn. Tato trubka nám poslouží jako vlnovod a nedovolí svazku, aby se z ní EM záření vyzářilo do okolí.

4.2 Návrh, konstrukce a proměření vlastností refrakčního členu

4.2.1 Návrh refrakčního členu

Refrakční člen také vychází z návrhu samotného spektrometru rotačních přechodů molekul. Pro výpočet poloměru křivosti jsem využil vztahu (10), do kterého jsem dosadil vhodné hodnoty. Materiál, který jsem zvolil pro výrobu čočky je polytetrafluoretylen, jehož index lomu je $n_2 \approx 1,35$. Index lomu prostředí, ze kterého vstupuje EM záření do čočky je přibližně 1, jelikož se jedná o vzduch. Ohnisková vzdálenost vyplývá z celého návrhu, a proto jsem dosadil $f = 0,5\text{m}$. Poloměr křivosti blíže ke zdroji je nekonečný, jelikož je čočka plankonvexní, což znamená, že jedna plocha je rovinná.

$$\frac{1}{0,5} = \left(\frac{1,35}{1} - 1 \right) \cdot \left(\frac{1}{\infty} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (13)$$

Po dosazení hodnot do rovnice mi vyšel požadovaný poloměr křivosti $R_2 = 0,207m$.

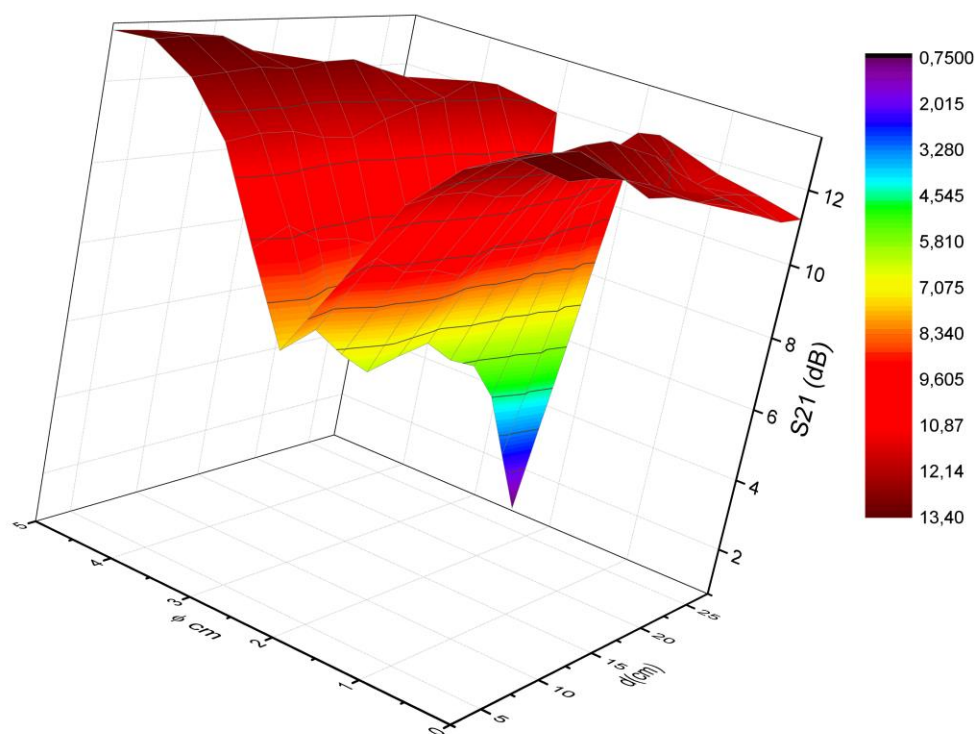
4.2.2 Konstrukce refrakčního členu

Čočka byla vyrobena z PTFE válce o průměru 50 mm. Jelikož je složité vyrobit čočku s požadovaným poloměrem křivosti pomocí soustruhu nebo jinou metodou, zvolil jsem tedy výrobu pomocí CNC stroje. Osobně nejsem vyučen v oboru zaměřeném na strojírenství a programování CNC strojů, proto jsem předal podklady k výrobě, programátorovi, který vytvořil program pro opracování materiálu do požadovaného tvaru. Poté byly zkonstruovány rovnou 2 čočky (viz. Obr. 25).

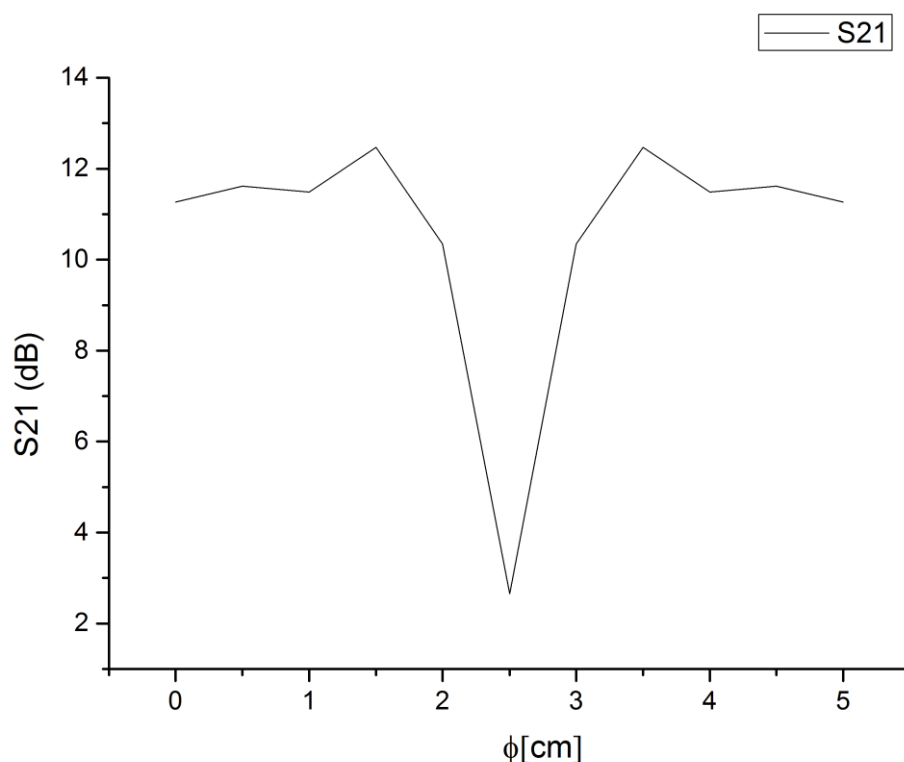


Obr. 25: Zkonstruované PTFE čočky.

čočku proměřit, musel jsem obě vyrobené čočky spojit k sobě rovinnými plochami, čímž se ohnisková vzdálenost zmenšila na polovinu.



Obr. 27: Graf závislosti přenosu S_{21} na vzdálenosti a místu zastínění.



Obr. 28: Graf profilu svazku v ohniskové vzdálenosti čočky.

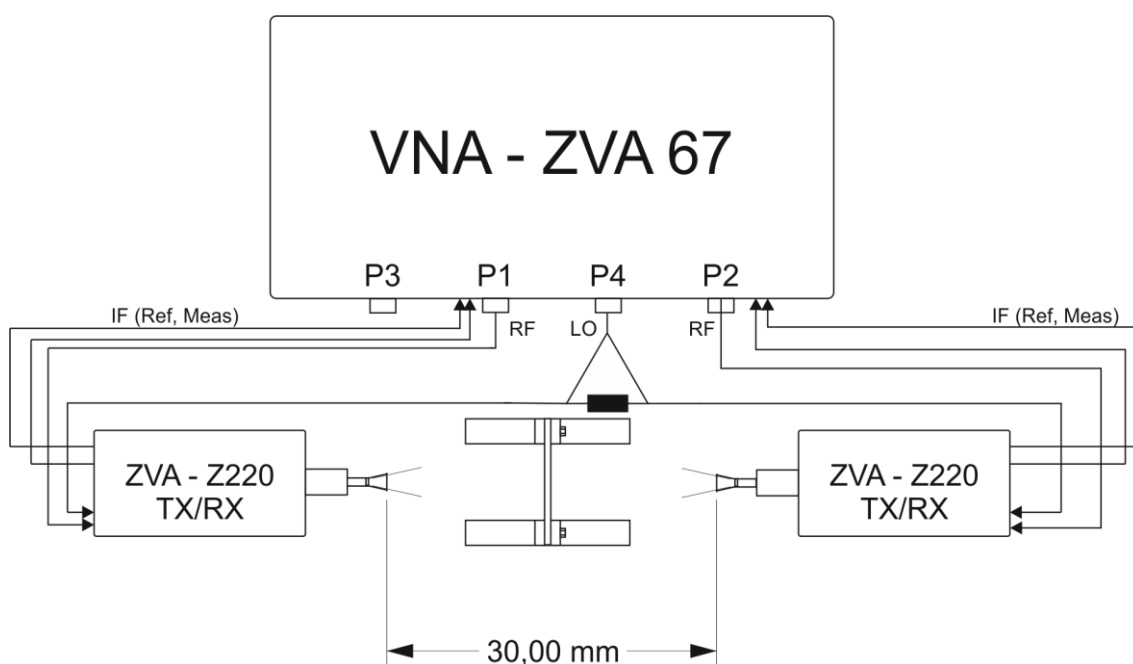
Z grafu na Obr. 27 je patrné, že se vzrůstající vzdáleností od čočky se svazek zužuje, což jednoznačně ukazuje, že zkonstruovaná čočka je funkční a zaostřuje EM záření dle předpokladů. Pro názornost byl do 2D grafu vynesena svazek ve vzdálenosti 25 cm, což je ohnisková vzdálenost dvou spojených čoček. Na tomto grafu je patrné, že zaostřený svazek v tomto místě je velmi úzký (šířka 1 cm).

Pro výpočet chyby měření jsem plech, kterým jsem zastiňoval EM záření, přiložil 10x na stejné místo a z naměřených hodnot jsem vypočítal střední odchylku $Stdev=0,07dB$. Předpokladem je, že bude chyba ve všech místech stejná, proto není nutné provádět měření 10x pro všechna měřená místa.

5 ÚVODNÍ MĚŘENÍ A NÁVRH DALŠÍHO POKRAČOVÁNÍ PRACÍ

5.1 Úvodní měření

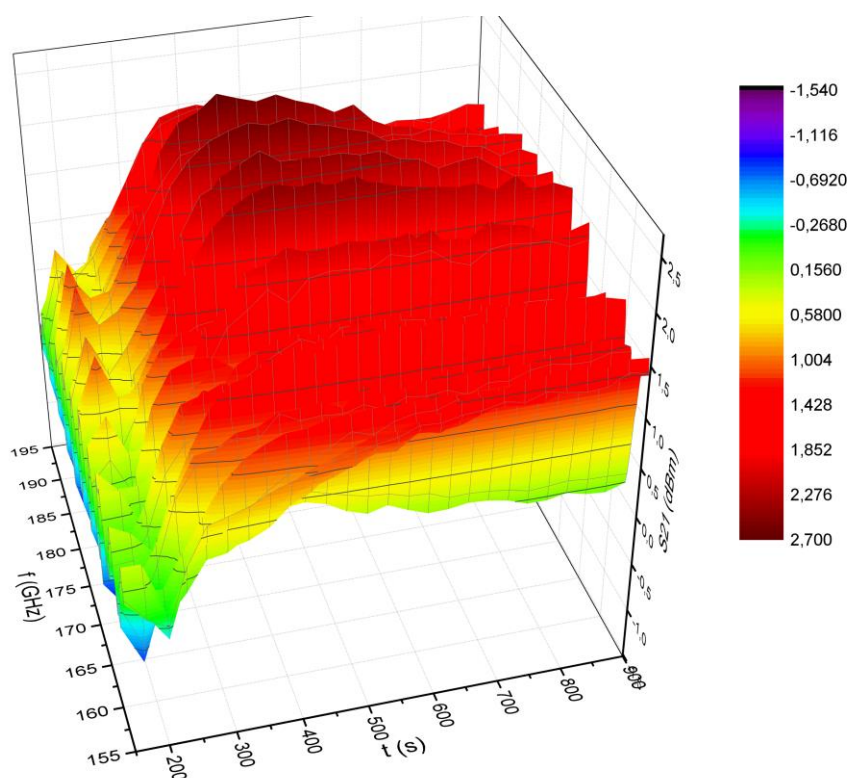
Jako úvodní měření jsem zvolil měření tuhnutí epoxydové pryskyřice, jež lze potenciálně využít jako spojovací materiál pro spektrometr. Měření vychází ze schématu na Obr. 29.



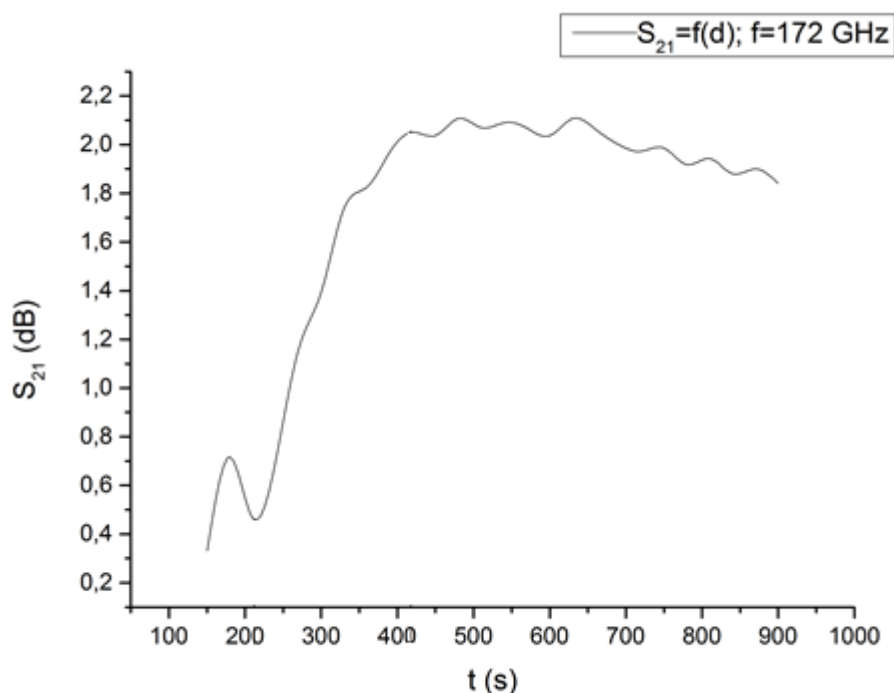
Obr. 29: Blokové schéma měření síťovací reakce epoxydové pryskyřice.

Při měření epoxydové pryskyřice jsem se zajímal o přenos S_{21} a jeho relativní změnu v průběhu síťovací reakce. Tento parametr jsem zkoumal ve frekvenčním pásmu 155-195 GHz v závislosti na čase. Krok změny frekvence byl 200 MHz, což znamená 201 bodů. Tato frekvence byla zvolena, protože v blízkosti frekvence 183GHz se nachází rotační pás vodní páry. Rozlišení IF filtru bylo nastaveno na 10 Hz. U epoxydové pryskyřice, kterou jsem použil, uvádí výrobce čas její zpracovatelnosti 5 min a čas manipulační pevnosti 15 minut. Jedno promítání trvalo 20s, a proto jsem zvolil $\Delta t = 30s$. Namíchaný testovaný vzorek byl proměřen v časovém úseku 150-900s což znamená, že byl každý vzorek proměřen 15x. Čas jsem začal měřit ve chvíli, kdy byly obě složky lepidla nanесeny a začal jsem je promíchávat. Epoxydová pryskyřice byla namíchána mezi 250g tvrdým papírem, jež sloužil jako spojovaný materiál. Antény s rozsahem 140-

220GHz, které byly umístěny na výstupy vlnovodu frekvenčních násobičů byly od sebe vzdáleny 3 cm. Tato vzdálenost byla zvolena tak, aby elektromagnetické záření procházelo přes celou plochu vzorku epoxydové pryskyřice. Vzorek byl umístěn takovým způsobem, aby byl kolmý k vyzařovanému svazku.



Obr. 30: Frekvenční závislosti přenosových vlastností vrstvy epoxydové pryskyřice v závislosti na čase v průběhu síťovací reakce.



Obr. 31: Závislost přenosu síťovací reakce na čase pro frekvenci 172 GHz.

Z grafu na Obr. 30 jde vidět, že pro různé frekvence jsou si přenosové vlastnosti vrstvy epoxydové pryskyřice velmi podobné. Pro názornou ukázkou jsem vybral závislost síťovací reakce na čase pro frekvenci 172 GHz (Obr. 31). Z tohoto grafu můžeme vyčíst, že v průběhu síťovací frekvence vzrůstá postupně přenos až do doby než se ustálí na průměrné hodnotě $S_{21}=2\text{dB}$ v čase 210s. Absorpce epoxydové pryskyřice s postupem času klesá až do doby, kdy se ustálí. Z tohoto vyplývá, že pokud nakalibrujeme měřicí soustavu až po vytvrzení pryskyřice, nebude s dalším postupem času vzrůstat absorpance. Měřením jsem tedy zjistil, že pokud použiji epoxydovou pryskyřici jako spojovací materiál u spektrometru milimetrových vln, nemělo by být měření negativně ovlivněno tímto spojovacím materiálem.

5.2 Návrh dalšího pokračování práce

Práce by se dále měla ubírat směrem detekce nebezpečných látek. Jako první se ovšem pokusím detekovat jednoduchou snadně dostupnou molekulu. Bude se jednat o molekulu vodní páry, jejíž rotační spektrum se dle literatury nachází na frekvenci 183,31 GHz. Toto měření bude vycházet z blokového schématu na *Obr. 18*, které bude ovšem pro účely tohoto měření upraveno. Úpravy budou spočívat především v přívodu měřeného plynu (vodních par) do měřicí trubice. Plynová bomba bude odpojena a bude uzavřen také ventil k jejímu přívodu.

Pro dosažení nasycení měřicí trubice vodními parami můžu použít dvě metody. Jednou z nich je umístění nádoby s vodou do měřicí trubice a nechat ji tam samovolně odpařovat, dokud nebude trubice nasycena vodními parami a poté ji vyjmout. Další metodou je umístění trubice nad horkou vodou, která se bude přímo do trubice vypařovat. Po nasycení trubice párou by se trubice hermeticky uzavřela a umístila zpět. První metoda je časově náročnější, protože samovolné odpařování vody zabere delší časový úsek, než vypařování horké vody. Vypařování horké vody má naopak nevýhodu v tom, že se začne srážet na stěnách trubice, která bude mít menší teplotu než pára. Na těchto sražených kapkách vody může docházet k odrazu EM záření a tím ke zkreslení výsledku měření. Která z těchto metod je vhodnější se bude muset prakticky ověřit.

Pro detekci úzkých rotačních pásů musím využít maximální rozlišení vektorového obvodového analyzátoru. Po sestavení sestavy se musí celý aparát nakalibrovat. Pro tento účel je vybaven VNA softwarem, který umožňuje kalibraci. Doporučená kalibrace pro toto měření je normalizovaná kalibrace obou portů. Vektorový obvodový analyzátor si projde celou měřicí cestu a eliminuje všechny rušení, které mohou vznikat na ohybech kabelů, impedančním přizpůsobení nebo v důsledku jiného rušení. Kalibrace musí proběhnout ještě před umístěním měřeného vzorku do měřicí trubice, abychom samotnou kalibraci neeliminovali i rotační pásy.

ZÁVĚR

Ve své bakalářské práci jsem se zabýval spektrometrií rotačních přechodů jednoduchých molekul, převážně tedy optickými prvky a jejich vlastnostmi pro využití při konstrukci spektrometru.

V teoretické části jsem objasnil teorii elektromagnetického záření, u kterého jsem rovněž specifikoval jeho dělení do jednotlivých spekter dle jejich vlnové délky. V další části jsem popsal některé druhy interakcí elektromagnetického záření s materiály a jejich projevy při spektrální analýze. Seznámil jsem se rovněž se základními konstrukčními principy uvažovaných optických prvků (koutový odražeč, plankonvexní čočka). Koutový odražeč byl určen k odrazu svazku EM záření zpět do směru, ze kterého do něj vstoupil. Plankonvexní čočka slouží k zaostření signálu do ohniska, jehož vzdálenost je určena vlastnostmi čočky. Součástí teoretické části je také samotný popis spektrometrie rotačních přechodů jednoduchých molekul v oblasti milimetrových vln. V neposlední řadě jsem popsal měřicí přístroje, které budou využity pro měření.

V praktické části jsem se zabýval návrhem a konstrukcí optických prvků pro konkrétní návrh spektrometru milimetrových vln, jež byl navržen společně s kolegou, který se zabývá samotnou konstrukcí spektrometru. Navrhl jsem koutový odražeč, důležitou část optické cesty, kterou bude procházet EM záření tak, aby co nejlépe splňoval požadavky, jež na něj budou kladeny. Tento odražeč jsem rovněž zkonstruoval z nerezového plechu a proměřil jeho vlastnosti. Po proměření jsem zjistil, že při umístění koutového odražeče v blízkosti antény dochází k odrazu na hranách a svárech čímž dochází k rozptylu záření do jiného směru, než ze kterého vstoupilo do odražeče. Tento jev nám však nevadí, jelikož bude odražeč umístěn ve větší vzdálenosti. Rovněž jsem navrhl plankonvexní čočku, která byla vyrobena CNC strojem na požadovaný poloměr křivosti. Tato čočka byla vyrobena s polytetrafluoretylenu. Čočka byla při měření přiložena k druhé totožné čočce, aby se zmenšila ohnisková vzdálenost, protože koaxiální kabely neměly dostatečnou délku. Po proměření této čočky jsem dostal předpokládaný vzhled svazku. Jako úvodní měření jsem proměřil vlastnosti epoxydové pryskyřice při síťovací reakci. Epoxydová pryskyřice je uvažována jako potenciální spojovací materiál, a proto bylo nutné zjistit, jestli nebude negativně ovlivňovat měření. Po proměření síťovací reakce jsem nezjistil žádný negativní vliv, který by mohla epoxydová pryskyřice zanášet do měření. Závěrem jsem nastínil další pokračování práce, které je zaměřeno na detekci jednoduchých molekul, především tedy

vodní páry. Celá práce směřuje ke konstrukci měřicí soustavy, která by byla schopna detekovat nebezpečné molekuly výbušnin nebo jiných nebezpečných látek.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

In my bachelor thesis I focused on spectrometry of rotational transitions of simple molecules, mainly optical elements and their properties for use in the construction of the spectrometer.

In the theoretical part, I explained the theory of electromagnetic radiation. I also specified, partitioning into individual spectrum according to their wavelength. In the next section, I describe some types of interaction of electromagnetic radiation with materials and their effects on spectral analysis. I also learned about the basic design principles considered optical elements (cube-corner reflector plano-convex lens). My corner reflector is designed to reflect EM radiation back in the direction from which it has entered. Plano-convex lens is used to focus the signal. The distance is determined by the characteristics of the lens. The theoretical part is also very description spectrometry rotational transitions of simple molecules in millimeter waves. Finally, I described the measuring instruments that will be used for the measurement.

In the practical part I focused on the design and construction of optical components for the specific design of millimeter wave spectrometer, which we designed together with a colleague who is dedicated to the design of the spectrometer. I have designed cube-corner reflector as an important part of the optical path that passes EM radiation. I also constructed reflector from stainless steel, and measured its properties. After measuring, I found that the location of the fillet reflectors near the antenna leads to reflection on the edges and weld of radiation into different direction than the one entered into the reflector. However, this phenomenon, do not mind me because the reflector will be positioned at a greater distance. I also designed plano-convex lens, which was made by CNC machine to the desired radius of curvature. This lens was made of polytetrafluoroethylene. For measure I attached two identical lenses together, to reduce focal length to half, because coaxial cables did not have sufficient length. After measurement of the lenses I got the expected appearance of the EM radiation. As an initial measure I measured the properties of epoxy resin crosslinking reaction. Epoxy resin is considered as a potential fastener. It was necessary to determine if it not have bad effect for the measurement. After measurement of the cross-linking reaction, I did not find any negative effect that might

epoxy resin introduced into the measurement. Finally, I outlined the continuation of the work that is focused on the detection of simple molecules (water vapor). The whole work is directed to the construction of the measuring system that would be able to detect dangerous molecules of explosives, or other dangerous substances.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] GORDY, Walter and Robert L COOK. *Microwave molecular spectra* [online]. Chichester: Wiley, 1984 ISBN 978-0-471-08681-9. Dostupné z: http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=1303
- [2] LÁČÍK, Jaroslav, Zbyněk LUKEŠ a Zbyněk RAIDÁ. *On Using Ray-Launching Method for Modeling Rotational Spectrometer*. June 2008, vol. 17, no. 2, s. 98-107. ISSN 1210-2512
- [3] PIKSA, Petr, Stanislav ZVANOVEC a Petr CERNÝ. *Elliptic and Hyperbolic Dielectric Lens Antennas in mm-Waves*. 2011, č. 1.
- [4] HANSEN, H. J. *Standoff Detection Using Millimeter and Submillimeter Wave Spectroscopy*. Proceedings of the IEEE. August 2007, vol. 95, no. 8, s. 1691-1704. ISSN 0018-9219
- [5] HIEBEL, Michael. *Fundamentals of vector network analysis*. München: Rhode, 2007, 419 s. ISBN 978-3-939837-06-0
- [6] Elektromagnetické vlnění. In: *Elektromagnetické vlnění* [online]. 2005 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://www.gymkren.cz/download/ucebni-texty/fyzika/f24.pdf>
- [7] FyzWeb. In: *Elektromagnetické vlny ve vakuu* [online]. 2007 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: http://fyzweb.cz/materialy/hvizdy/3_elmagvakuum.pdf
- [8] Elektromagnetické spektrum. In: *Elektromagnetické spektrum* [online]. 2006 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://jan.gfxs.cz/studium/files/optika/spektrum.pdf>
- [9] Světlo a barva ve fotografii. In: *Fotorádce* [online]. 2010 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://www.fotoradce.cz/blog/svetlo-a-barva-ve-fotografii-idc227>
- [10] Petulina. *Petulina* [online]. 2010, 26. 11. 2010 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://petulina.euweb.cz/galerie.php?cat=45>
- [11] Interakce elektromagnetického záření s hmotou. In: *Úvod do parametrické identifikace* [online]. 2010 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: www.fm.tul.cz/esf0247/download_file.php/Interakce%20zareni%20s%20hmotou.pdf?id=563.
- [12] Corner reflector. *Corner reflector* [online]. 2004 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: http://www.princeton.edu/~achaney/tmve/wiki100k/docs/Corner_reflector.html

- [13] Analýza průchodu paprskových svazků kouotvým odražečem. *Analýza průchodu paprskových svazků kouotvým odražečem* [online]. 2005 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/MATLAB07/prispevky/kytka_novak/kytka_novak.pdf
- [14] *Analýza průchodu svazku koutovým odražeče*. Praha, 2008. Studenská vědecká a odborná činnost. ČVUT v Praze.
- [15] Geometrický optika. In: *Fyzika* [online]. 2002 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://www.e-fyzika.cz/kapitoly/08-geometricka-optika.pdf>
- [16] Snellův zákon. *Optika* [online]. 2001 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0211.htm>
- [17] Molekulová spektroskopie. In: *Molekulová spektroskopie* [online]. 2011 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://www.sci.muni.cz/chemsekce/frvs2011/pdf/mol-spec.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

EM	Elektromagnetická.
E	Vektor elektrické složky elektromagnetického záření.
B	Vektor magnetické složky elektromagnetického záření.
IR	Infračervené záření.
λ	Vlnová délka.
UV	Ultrafialové záření.
KO	Koutový odražeč.
VNA	Vector network analyzer.
PTFE	Polytetrafluoretylen.

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1: Elektromagnetická vlna. [6]</i>	11
<i>Obr. 2: Elektromagnetické spektrum.</i>	12
<i>Obr. 3: Zachycené IR záření pomocí IR kamery. [8]</i>	14
<i>Obr. 4: Viditelné spektrum světla. [9]</i>	14
<i>Obr. 5: Roentgen ruky. [10]</i>	15
<i>Obr. 6: Schéma podstaty Comptonova jevu. [11]</i>	18
<i>Obr. 7: Princip fotoelektrického efektu. [11]</i>	18
<i>Obr. 8: Vlevo koutový odražeč umístěný na měsíci, vpravo laser, pomocí něhož se měří vzdálenost Země-Měsíc. [14]</i>	20
<i>Obr. 9: Průchod paprsku koutovým odražečem. [12]</i>	21
<i>Obr. 10: Čočky – spojky. [15]</i>	21
<i>Obr. 11: Čočky – rozptylky. [15]</i>	22
<i>Obr. 12: Snellův zákon lomu.</i>	22
<i>Obr. 13: Plankonvexní čočka.</i>	23
<i>Obr. 14: Absorpce EM záření kyslíkem a vodní parou. [4]</i>	24
<i>Obr. 15: Schéma spektrometru rotačních přechodů molekul.</i>	25
<i>Obr. 16: Blokový diagram R&S - ZVA 67.</i>	26
<i>Obr. 17: Zapojení frekvenčních násobičů.</i>	27
<i>Obr. 18: Blokové schéma spektrometru milimetrových vln. (Autor: Lukáš Urbančok)</i>	29
<i>Obr. 19: Koutový odražeč.</i>	31
<i>Obr. 20: Konstrukce koutového odražeče.</i>	31
<i>Obr. 21: Vyrobený koutový odražeč.</i>	32
<i>Obr. 22: Blokové schéma měření koutového odražeče s proměnlivou vzdáleností.</i>	33
<i>Obr. 23: Graf odrazu KO v závislosti na frekvenci a na vzdálenosti od vysílací antény.</i>	34
<i>Obr. 24: Závislost odrazu S11 na vzdálenosti KO od vysílací antény na frekvenci $f=197,12\text{GHz}$.</i>	34
<i>Obr. 25: Zkonstruované PTFE čočky.</i>	36
<i>Obr. 26: Blokové schéma měření tvaru svazku po průchodu čočkou.</i>	37
<i>Obr. 27: Graf závislosti přenosu S21 na vzdálenosti a místu zastínění.</i>	38
<i>Obr. 28: Graf profilu svazku v ohniskové vzdálenosti čočky.</i>	39
<i>Obr. 29: Blokové schéma měření síťovací reakce epoxydové pryskyřice.</i>	40

<i>Obr. 30: Frekvenční závislosti přenosových vlastností vrstvy epoxydové pryskyřice v závislosti na čase v průběhu síťovací reakce.</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 31: Závislost přenosu síťovací reakce na čase pro frekvenci 172 GHz.</i>	<i>42</i>

SEZNAM PŘÍLOH

P I: PUBLIKACE AUTORA

PŘÍLOHA P I: PUBLIKACE AUTORA

- [1] URBANČOK, L.; JURÍČEK, O.: *Dielektrická spektroskopie vybraných materiálů v oblasti elektromagnetického spektra 140-220 GHz*. In Studentská tvůrčí a odborná činnost STOČ 2013. Zlín: Fakulta aplikované informatiky, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2013.