

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická Katedra mikroelektroniky

Spektrometrie v IR oblasti

Infrared Spectrometry

Bakalářská práce

Studijní program: Komunikace, Multimédia a Elektronika

Studijní obor: Aplikovaná Elektronika

Vedoucí práce: Ing. Alexandr Laposa

Vojtěch Skřivánek

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou práci zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a používal jsem pouze literaturu v práci uvedenou. Dále prohlašuji, že nemám námitek proti půjčování nebo zveřejňování mé diplomové práce nebo její části se souhlasem katedry.

V Praze dne: 23.5.2014

.....

podpis studenta

Poděkování

Mé největší poděkování patří vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Alexandru Laposovi za jeho pomoc, rady a také trpělivost. Když jsem měl potíže nebo nevěděl, jak pokračovat, vždy mě navedl na správnou cestu k cíli, za což mu jsem velmi vděčný.

Dále bych rád poděkoval panu Ing. Jiřímu Kroutilovi. Jeho praktické rady a zkušenosti mi často pomohly překonat problémy při realizaci mé práce.

Díky za drobné rady patří i mým spolužákům, z nichž děkuji především Bc. Martinovi Ládyšovi za vytvoření 3D modelu.

V neposlední řadě děkuji celé mé rodině za duševní i finanční pomoc a to nejen během psaní této práce, ale po celou dobu mého studia. Děkuji jim za poskytnutí klidného zázemí pro studium i za trpělivost, kterou se mnou museli často mít. Original zadání práce

Anotace

Tato práce se zabývá analýzou plynů pomocí infračervené spektrometrie. Zaměřuje se především na nedisperzivní metodu měření s pyroelektrickým detektorem záření. Toto téma je uvedeno teoretickým rozborem a zakončeno praktickým využitím.

První část práce obsahuje rozbor problematiky analýzy plynů pomocí infračervené spektrometrie. Popisuje všechny části měřicícho řetězce, vysvětluje používané fyzikální principy a porovnává praktická řešení.

Druhá část je zaměřená na komerční pyroelektrický detektor s laditelným filtrem záření od firmy InfraTec. V úvodu je popsán princip funkce tohoto moderního senzoru. Poté následuje jeho charakterizace pomocí několika měření.

Poslední část využívá teoretického rozboru k sestavení funkčního, přenosného a cenově dostupného přístroje měřícího koncentraci oxidu uhličitého. Tato část popisuje všechny funkční bloky vyrobeného přístroje a v závěru uvádí možná rozšíření a vylepšení, která čekají na budoucí realizaci.

Klíčová slova

Infračervená spektrometrie, spektroskopie, pyroelektrický detektor,

Fabry-Perotův filtr, příruční přenosný měřicí přístroj, oxid uhličitý

Annotation

This research deals with the analysis of gases by infrared spectroscopy. It focuses primarily on nondispersive method of measurements with pyroelectric radiation detector. This task is introduced by theoretical analysis and ends with practical use.

The first part contains an analysis of gas detection by infrared spectroscopy. Describes all parts of the measuring chain, explains used physical principles and compares practical solutions.

The second part is focused on commercial pyroelectric detector with tunable radiation filter from InfraTec company. Describes the function principles of this modern sensor followed by its characterization, verified by several measurements.

The last part uses the theoretical analysis to build a functional, portable and affordable handheld device for measuring the concentration of carbon dioxide. This section describes all the functional blocks of device and at the end presents possible extensions and upgrades waiting for future implementation.

Key words

Infrared spectrometry, spectroscopy, pyroelektric detector, Fabry-Perot filter, příruční přenosný měřicí přístroj, oxid uhličitý

Obsah

1	ÚVOD			
2 INFRAČERVENÝ DETEKTOR PLYNU		ČERVENÝ DETEKTOR PLYNU	2	
	2.1 ZPŮS 2.2 ABSC 2.3 IR AN 2.3.1	SOBY DETEKCE PLYNŮ DRPCE PLYNŮ NALÝZA PLYNŮ Princip IR analýzy	2 2 4 4	
	2.3.2	Analyzátor s (ne)selektivním zdrojem	5	
	2.3.3	(Bez)disperzní analyzátor	6	
	2.3.4	Pozitivní a negativní filtrace	7	
	2.4 IR ZI 2.4.1	DROJE Selektivní zdroje	8 8	
	2.4.2	Neselektivní zdroje	11	
	2.5 IR DI 2.5.1	ETEKTORY Fotodetektory	12 <i>13</i>	
	2.5.2	Tepelné detektory	14	
	2.6 Pyrc	DELEKTRICKÉ MATERIÁLY	20	
	2.7 OPTI	CKÁ CESTA		
	2.7.1	Nyveu	22 22	
	2.7.2	Filter	22	
3	PYROI	ELEKTRICKÝ SENZOR PLYNU S LADITELNÝM FILTREM		
	3.1 ÚVO	D		
	3.3 PROV	VEDENÍ FILTRU		
	3.4 Prov	VOZ FILTRU		
	3.5 KON	STRUKCE SENZORU		
	3.0 KIZE 3.7 MĚŘ	NI SENZORU ICÍ APARATURA		
	3.8 MĚŘ	ENÍ SE SENZOREM S F-P FILTREM		
	3.8.1	Měření vlhkosti	31	
	3.8.2	Měření s konstantním průtokem	31	
	3.8.3	Měření s konstantní koncentrací	34	
	3.8.4	Měření s dlouhou cestou	37	
	3.8.5	Další modifikace	39	
4	PŘENO	DSNÝ SENZOR OXIDU UHLIČITÉHO		
	4.1 Úvo	D		
	4.2 Мікн	ROKONTROLER LPC1768 – MBED	40	
	4.3 PYRC	DELEKTRICKÝ DETEKTOR		
	4.3.1 1 2 2	zesnovac pro pyroelekirický deleklor	4141 10	
	4.3.2	Snimuni signulu 2 pyroelektrickeno uelektoru		
	4.4 ZDRO 4.5 Říze	JJ IK ZAKENI A JEHO RIZENI NÍ PROUDĚNÍ PLYNU		
	4.6 Opti	CKÁ CESTA		
	4.7 MĚŘ	ENÍ TEPLOTY A VLHKOSTI		

	4.8	ZOBRAZOVAČ	45
	4.9	NAPÁJENÍ	
	4.10	Krabička	45
	4.11	Blokové schéma	
	4.12	VÝVOJOVÝ DIAGRAM PROGRAMU MIKROKONTROLERU	
	4.13	NAMĚŘENÉ HODNOTY A VLASTNOSTI	
	4.14	ZÁKLADNÍ PARAMETRY	
	4.15	NÁVRH DALŠÍHO POSTUPU	
5	Z	ÁVĚR	50
6	P	OUŽITÁ LITERATURA	51
6 7	P P	OUŽITÁ LITERATURAŘÍLOHY	51 54
6 7	P P 7.1	OUŽITÁ LITERATURA ŘÍLOHY Průtoky při měření s pyrodetektorem s F-P filtrem	51 54 54
6 7	P P 7.1 7.2	OUŽITÁ LITERATURA ŘÍLOHY Průtoky při měření s pyrodetektorem s F-P filtrem Absorpční spektra měřených látek	51 54 54 55
6 7	P P 7.1 7.2 7.3	OUŽITÁ LITERATURA ŘÍLOHY Průtoky při měření s pyrodetektorem s F-P filtrem Absorpční spektra měřených látek Schéma zapojení	51 54 54 55 58
6 7	P P 7.1 7.2 7.3 7.4	OUŽITÁ LITERATURA ŘÍLOHY Průtoky při měření s pyrodetektorem s F-P filtrem Absorpční spektra měřených látek Schéma zapojení Seznam součástek a přibližná kalkulace	51 54 54 55 58 60
6 7	P P 7.1 7.2 7.3 7.4 7.5	OUŽITÁ LITERATURA ŘÍLOHY Průtoky při měření s pyrodetektorem s F-P filtrem Absorpční spektra měřených látek Schéma zapojení Seznam součástek a přibližná kalkulace Plošné spoje	51 54 55 58 60 61

Seznam použitých symbolů a zkratek

Analogově digitální převod
Střední vlnová délka (z anglického Central WaveLength)
České vysoké učení technické
Stejnosměrný proud (z anglického Direct Current)
Fakulta elektrotechnická
Fabry-Perot
Fabry-Perotův interferometr
Šířka pásma pro poloviční maximum (z anglického Full Width at Half
Maximum)
Elektrická zem (z anglického Ground)
Vstupně/výstupní (z anlgického Input/Output)
Seriová komunikační sběrnice (z anglického Inter-Integrated Circuit)
Infračervené (z anglického InfraRed)
Polem řízený tranzistor s přechodovým hradlem (z anglického Junction
Field-Effect Transistor)
Zobrazovač s tekutými krystaly (z anglického Liquid Crystal
Display)
Svítivá dioda (z anglického Light Emitting Diode)
Dlouhá cesta (z anglického Long Path)
Lineárně proměnný filtr (z anglického Linear Variable Filter)
Mikro elektro-mechanický systém
Střední infračervené pásmo (z anglického Middle InfraRed)
Nedisperzivní infračervená analýza (z anglického NonDispersive
InfraRed)
Operační zesilovač
Počítač (z anglického Personal Computer)
Přechod prvků různých vodivostí s vloženou intrinsickou vrstvou
Přechod prvků různých vodivostí
Relativní vlhkost (z anglického Relative Humidity)
Secure Digital – typ paměťové karty
Senzor vlhkosti a teploty (z anglického Sensor of Humidity and
Temperature)
Zařízení pro povrchovou montáž (z anglického Surface Mount Device)
Odstup signálu a šumu (z anglického Signal to Noise Ratio)

SPI	Sériové periferní rozhraní (z anglického Serial Peripheral Interface)
TIA	Trans-impedanční zesilovač (z anglického TransImpedance Amplifier)
USB	Univerzální sériová sběrnice (z anglického Universal Seriál Bus)
UV	Ultrafialové (z anglického UltraViolet)
VŠCHT	Vysoká škola chemicko-technologická

Seznam tabulek

Rozdíly selektivního a neselektivního zdroje	5
Rozdíly disperzního a bezdisperzního analyzátoru	6
Rozdíly pozitivní a negativní filtrace	8
Rozdělení IR detektorů	13
Vlastnosti dvou různých provedení termočlánkových detektorů	16
Nejpoužívanější pyroelektrické materiály a jejich vlastnosti [13]	21
Procentuální pokles naměřeného výstupního signálu pro dlouhou a	krátkou
	37
Průtoky a koncentrace pro měření s konstantním průtokem	54
Průtoky a koncentrace pro měření s konstantní koncentrací	54
Průtoky a koncentrace pro měření s konstantní koncentrací s dlouhou l	kyvetou
	55
Seznam součástek a jejich cena (* - bylo vyrobeno na ČVUT)	60
	Rozdíly selektivního a neselektivního zdroje Rozdíly disperzního a bezdisperzního analyzátoru Rozdíly pozitivní a negativní filtrace Rozdělení IR detektorů Vlastnosti dvou různých provedení termočlánkových detektorů Nejpoužívanější pyroelektrické materiály a jejich vlastnosti [13] Procentuální pokles naměřeného výstupního signálu pro dlouhou a Průtoky a koncentrace pro měření s konstantním průtokem Průtoky a koncentrace pro měření s konstantní koncentrací Průtoky a koncentrace pro měření s konstantní koncentrací s dlouhou l

Seznam obrázků

Obr. 1.	Změna energetických stavů v závislosti na vlnové délce absorbovaného	o záření
[1] Ohr 2	Dělaní ID analymítanů [2]	3
Obr. 2.	Deleni IK analyzatoru [2]	4
Obr. 3 .	Disperzni analyzator	6
Obr. 4.	Bezdisperzni analyzator	6
Obr. 5.	Schema bezdisperzniho analyzatoru s pozitivni filtraci	7
Obr. 6.	Schema bezdisperzniho analyzatoru s negativni filtraci	
Obr. 7.	a) celé spektrum; b) spektrum přijaté detektorem při negativní filtra	acı (bez
vyšrafová	ání); c) spektrum přijaté při pozitivní filtraci[2]	8
Obr. 8.	Vlevo IR LED, vpravo obvyklá vyzařovací charakteristika [3,4]	9
Obr. 9.	Charakteristiky MID-IR LED pro nižší (vlevo nahoře) a vyšší vlnov	é délky
(vlevo do	ble) a MID IR LED [5, 27]	10
Obr. 10.	Laserová LED (vlevo), typické spektrum laseru (vpravo) [6]	10
Obr. 11.	Vyzařovací charakteristika tepelného zdroje záření [6]	11
Obr. 12.	Tepelný zdroj s odporovým drátem [15]	11
Obr. 13.	Různá provedení tenkovrstvých tepelných zářičů [30,6]	12
Obr. 14.	Příklad závislosti modulační hloubky zářiče na modulační frekvenci	[6]12
Obr. 15.	Pásma fotodetektoru intrinsického (a) a extrinsického (b) [10]	13
Obr. 16.	InGaAs PIN Fotodioda FGA21 firmy Thorlabs (vlevo) a její sp	ektrální
charakter	ristika (vpravo, zelená čára) [6]	14
Obr. 17.	Fotovodivostní detektor (vlevo) a jeho závislost výstupního signálu	a šumu
na napáje	ení (vpravo) [6]	14
Obr. 18.	Golayova cela [14]	15
Obr. 19.	Bolometr	15
Obr. 20.	Ziednodušené schéma termočlánkového detektoru [17]	
Obr. 21.	Schéma pyroelektrického detektoru s můstkovou strukturou [11]	
Obr. 22	Kompenzace změn teploty okolí mechanického namáhání a mikro	fonního
efektu [2]	3]	17
Obr 23	Detail pyrodetektoru, černé plošky isou absorbující filmy na pyrom	ateriálu
světlé iso	u odrazivé filmy na kompenzačních členech [25]	18
Obr 24	Pyrolektrický detektor (kompenzovaný) v zapojení s LFET v nan	ěť ovém
001. 24. módu (vl	evo) a s operačním zesilovačem v proudovém modu (vpravo) [8]	18
Obr 25	Odezya proudového (vlevo) a papěťového (vpravo) zapojení [8]	10
Obr. 25 .	Typická závislost papěťová odezvy pa frekvenci [10]	10
Obr. 20. Obr. 27	Dyoukonálový nyrodoletriaký sonzor [24]	19
Obt. 27.	Čegový průběh výstupu detektoru v závislosti na změně intenzity.	
ODI. 20.	Casovy pruden vystupu detektoru v zavisiosti na zmene imenzity ir	
$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	Zévielezt enerténné neleminese e nymeelelytmielyéhe lyeoficienty ne	
Obr. 29.	Zavisiost spontanni polarizace a pyroelektrickeno koeficientu na	teplote
[12]		
Obr. 30.	Vlnové délky propouštěné fluoridem vápenatým [6]	22
Obr. 31.	Vlnové délky propouštěné satírem [6]	23
Obr. 32.	Vlnové délky propouštěné fluoridem hořečnatým [6]	23
Obr. 33.	Vlnové délky propouštěné fluoridem barnatým (červeně) [6]	23
Obr. 34.	Vlnové délky propouštěné selenidem zinčnatým [6]	24
Obr. 35.	Vlnové délky propouštěné germaniem [6]	24
Obr. 36.	Přehled propustností všech častých materiálů pro okénka [13]	24
Obr. 37.	Funkce tenkovrstvého filtru [29]	25

Obr. 38.	Ukázka filtrů nabízející firma Perkin Elmer [7]	25			
Obr. 39.	Schématické sestavení a funkce propustnosti Fabry-Peroto	ova			
interferometru [33]					
Obr. 40.	Princip designu detektoru s laditelným filtrem [32]	27			
Obr. 41.	Destička nosiče pohyblivého zrcadla vyrobené suchým leptáním (vlevo)) a			
detail pružir	ny s prvkem kompenzujím namáhání v podélném směru (vpravo) [32]	27			
Obr. 42.	Spektrální propustnost (vlevo), šířka pásma a střední vlnová délka (vprav	<i>v</i> 0)			
F-P filtru v	závislosti na napětí [32]	28			
Obr. 43.	Schéma a obrázek laditelného pyroelektrického detektoru s laditelný	ým			
filtrem [32]		29			
Obr. 44.	Zapojení pyroelektrického detektoru s laditelným filtrem [32]	29			
Obr. 45.	měřicí aparatura	31			
Obr. 46.	Výstupní signál senzoru při průtoku 10 ml/min	32			
Obr. 47.	Výstupní signál senzoru při průtoku 20 ml/min	32			
Obr. 48.	Rozdíl výstupního signálu pro dusík a měřené látky při průtoku 10 ml/m	nin			
		33			
Obr. 49.	Rozdíl výstupního signálu pro dusík a měřené látky při průtoku 20 ml/m	nin			
		33			
Obr. 50.	Výstupní signál senzoru při koncentraci 5 000 ppm	35			
Obr. 51.	Výstupní signál senzoru při koncentraci 10 000 ppm	35			
Obr. 52.	Rozdíl výstupního signálu pro dusík a měřené látky při koncentraci 5 0	00			
ppm		36			
Obr. 53.	Rozdíl výstupního signálu pro dusík a měřené látky při koncentraci 10 0	000			
ppm		37			
Obr. 54.	Výstupní signál senzoru při koncentraci 10 000 ppm s 8 cm kyvetou	38			
Obr. 55.	Výstupní signál při koncentraci 10 000 ppm se 16,5 cm kyvetou (LP = lo	ng			
path)		38			
Obr. 56.	Vývojová platforma Mbed s mikrokontrolerem LPC1768 [44]	41			
Obr. 57.	LHI 814 a jeho vnitřní zapojení [45]	41			
Obr. 58.	Schéma aktivní pásmové propusti	42			
Obr. 59.	Schéma budiče IR zdroje	43			
Obr. 60.	MIRL17-900 [46]	43			
Obr. 61.	Schéma budiče ventilátoru	44			
Obr. 62.	Návrh pozlacené středové (vlevo) a krajní (uprostřed) části měrné kyvetv	y a			
jejich sestav	/a (vpravo)	44			
Obr. 63.	Schéma zapojení SHT15	44			
Obr. 64.	Senzor SHT [46]	45			
Obr. 65.	Pohled na vrchní část (vlevo) a vnitřek (vpravo) přístroje	46			
Obr. 66.	Blokové schéma přístroje	46			
Obr. 67.	Vývojový diagram řídícího programu	47			
Obr. 68.	Výstupní napětí ze senzoru při pokusném měření	48			
Obr. 69.	Absorpční spektrum Toluenu [d1]	55			
Obr. 70.	Absorpční spektrum Acetonu [d1]	55			
Obr. 71.	Absorpční spektrum Benzenu [d1]	56			
Obr. 72.	Absorpční spektrum Isopropyl alkoholu [d4]	56			
Obr. 73.	Absorpční spektrum Cyklohexanu [d3].	56			
Obr. 74.	Absorpční spektrum Metyl alkoholu [d2]	57			
Obr. 75.	Schéma zapojení IR analyzátoru	58			
Obr. 76.	Schéma zapojení LCD Nokia 6610 [d5]	59			
Obr. 77.	Vrchní (nahoře) a spodní strana (dole) DPS pro řídící elektroniku	61			

Obr. 78.	DPS pro senzor LHI814	61
Obr. 79.	DPS pro IR zdroj MIRL17-900	61
Obr. 80.	DPS pro senzor teplotní a vlhkostní senzor SHT15	62

1 Úvod

Hlavním cílem této práce je vytvoření příručního zařízení detekující CO_2 . Detekce bude prováděna pomocí atomové absorpční spektroskopie ve středním infračerveném pásmu. Zařízení bude tedy přenosné, napájeno z baterií, řízeno mikroprocesorem a bude schopné ukládat a exportovat naměřené hodnoty ve formě tabulky. Takový přístroj bude vhodný pro snadné měření koncentrace tohoto skleníkového plynu například u vytížených městských křižovatek, elektráren nebo jiných průmyslových budov. Přístroj by měl být skladný, spolehlivý a levný. Měl by mít malou energetickou spotřebu a snadné ovládání. Zároveň bude sloužit jako prototyp pro realizaci druhé generace přístroje, který bude obsahovat detektor pro více plynů (CO, CO_2 , NO_x , uhlovodíky)

První část této práce je rešeršní teoretický rozbor analýzy plynů pomocí absorpční spektroskopie. Tento rozbor je záměrně orientován tak, aby směřoval k hlavnímu cíli: najít nejvhodnější řešení pro výrobu přenosného detektoru CO₂.

Dalším cílem je charakterizace nového pyroelektrického detektoru plynů s laditelným filtrem od firmy InfraTec, který ČVUT nedávno zakoupilo. Provedeme měření několika plynů při různých vlhkostech, koncentracích, průtocích a délkách kyvety a vyvodíme závěry.

Účelem práce je projít celým výrobním procesem zařízení, čímž získám mnoho cenných zkušeností. Cíle práce jsou:

- Teoretický rozbor detekce plynu v IR oblasti

- Seznámení s konstrukcí zakoupeného pyroelektrického senzoru s Fabry-Perotovým filtrem a jeho následná charakterizace

- Sestavení přenosného zařízení pro detekci oxidu uhličitého dle kroků:

- Najít, rozpoznat a zpracovat důležité informace o zadané problematice
- Vybrat nejvýhodnější řešení (ekonomické, elektronické, mechanické)
- Vybrat nejvhodnější zapojení a součástky obvodu
- Naprogramovat mikrokontroler
- Navrhnout vhodný plošný spoj a poté jej osadit
- Získat a zpracovat data ze zkušebních měření

- Prezentovat výsledky mé práce

Na takové úkoly mě škola připravuje, ale dovednosti si osvojím pouze praxí. Proto jsem rád, že je moje bakalářská práce velmi praktická, protože takové dovednosti můj budoucí zaměstnavatel jistě vřele přivítá.

2 Infračervený detektor plynu

2.1 Způsoby detekce plynů

Detektory plynů lze rozdělit do tří kategorií: chemické, fyzikálně-chemické a fyzikální.

Chemické se zakládají na reakci měřených látek s detekčními látkami. Po reakci se měří nejčastěji změna barvy (kolorometrická metoda), vznik napětí (elektrochem. metoda), nebo změna fluorescence (fluorescenční metoda). Nevýhodou chemické detekce je ovlivnění měřené látky detekční látkou (například detekční papírky jsou na jedno použití), složitost zařízení a náročnost na obsluhu. Ovšem někdy jsou jediné, které dokáží analyzovat některé měřené látky.

Fyzikálně-chemické detektory, jak už vyplývá z názvu, kombinují dva principy. Během chemické reakce, která vzniká díky působení detekční látky, se měří změna fyzikálních veličin (reakční teplo, změna průchodu napětí či proudu, změna vodivosti reagující látky).

Fyzikální měří některou z fyzikálních veličin, jako je například rychlost zvuku, lom světla, absorpce, hustota atd., které jsou závislé na průchodu měřenou látkou. Výhodou těchto detektorů je především to, že neovlivňují měřenou látku, a dají se použít mnohonásobně. Nevýhodou je jejich závislost na okolním prostředí – například na tlaku a teplotě. Do této skupiny patří právě detektor plynu měřící absorpci infračerveného záření.

2.2 Absorpce plynů

Absorpce či emise atomů plynů je způsobena změnou energetického stavu elektronů, a to podle toho, zda přechází do vyšší, či nižší energetické hladiny. Pro tento děj platí Bohrova rovnice (1)

$$hv = E_2 - E_1 = \Delta E \tag{1}$$

kde *h* je Planckova konstanta, *v* je frekvence záření, E_2 je stav s vyšší a E_1 s nižší energií.

Jednotlivé atomy mají malý počet energetických stavů, které jsou tvořeny periodickým oběhem elektronů kolem jádra atomu. Z toho vyplývá, že absorbují relativně malé množství úzkých spektrálních čar.

Na rozdíl od jednotlivých atomů mají molekuly mnohem více energetických stavů. Je to proto, že u nich existují další dva periodické pohyby: rotace molekuly kolem jejího těžiště a vibrace atomů molekuly. Za zjednodušujícího předpokladu, že jsou tyto tři energie vzájemně nezávislé, můžeme psát rovnici

$$\Delta E = \Delta E_r + \Delta E_v + \Delta E_e \tag{2}$$

tedy že celková změna energie je součtem změn energie rotační, vibrační a elektronové. Platí $\Delta E_r \ll \Delta E_v \ll \Delta E_e$, rozdíly energií se od sebe liší přibližně o dva řády.

Z toho vyplývá, že na změnu rotačního stavu stačí energeticky slabé vzdálené infračervené (dále jen IR) záření, změny vibračního stavu způsobí střední IR záření. Pro změnu elektronového stavu je zapotřebí hodně energie, kterou má záření viditelného světla a ultrafialové (dále UV). Energii nemusí samozřejmě předávat pouze záření, ale může to být třeba teplo nebo elektřina.

Je třeba říci, že při změně elektronového stavu vždy proběhnou změny vibračních a rotačních stavů, protože jsou energeticky méně náročné. Čistě elektronová ani vibrační změna stavu není možná. Názorně je to vidět na obrázku 1.



Obr. 1. Změna energetických stavů v závislosti na vlnové délce absorbovaného záření [1]

Drtivá většina plynů (ale i kapalin) má více atomů, a proto absorbují či emitují světlo od UV do vzdáleného IR spektra. Toho sedá velmi snadno využít právě u optické spektrální analýzy plynů.

Spektrální analyzátory plynů využívají absorpci světla. Tato absorpce je popsána Lambert-Beerovým zákonem (3)

$$\phi = \phi_0 e^{-\beta d} \tag{3}$$

kde ϕ je světelný tok, *d* je tloušťka prostředí, kterým tok prochází, a β je absorpční koeficient. Exponent βd se také nazývá absorbance *A* (relativní vyjádření množství pohlceného světla). Je možné jej vyjádřit více způsoby

$$A = \beta d = \varepsilon_{\lambda} c d \tag{4}$$

kde *c* je koncentrace látky v prostředí a ε_{λ} je molární absorpční koeficient pro vlnovou délku λ (vyjadřuje absorbanci látky o molární koncentraci 1 *mol/dm*³

v kyvetě o tloušťce 1 *cm* při konstantní λ dopadajícího monochromatického záření.). Je vhodné zmínit, že absorpce se logaritmicky zvyšuje (rozšiřuje se absorpční pásmo) v závislosti na zvyšujícím se tlaku. Proto by se měla měřit při vyšších tlacích, kde se absorpce v závislosti na tlaku mění již nepatrně.

Důležité je, že ε_{λ} je úzce spojen s velikostí částic látky, která určuje, jaké λ bude látka absorbovat nejvíce. Velikost částic se u většiny látek liší, a proto mají vrcholy absorpce při rozdílných λ . Právě tohoto faktu využívají i IR analyzátory plynů.

Absorpci v blízkém a vzdáleném IR spektru vykazují pouze látky, které mají v molekule alespoň dva druhy atomů. Proto například kyslík, dusík, halogeny a jiné vzácné elementární látky absorpci v IR spektru nezpůsobují (nebo pouze zanedbatelnou). Problém nastává ve chvíli, kdy běžně se vyskytující plynné směsi, které chceme měřit, mají blízký vrchol absorpce (což klade nároky na selektivitu analyzátoru)

2.3 IR analýza plynů

Na rozdíl od UV oblasti, skoro každý plyn pohlcuje část IR záření na více vlnových délkách. Proto lze touto metodou měřit mnoho látek. Je však třeba zabývat se jejich interferencemi, které jsou v této části spektra velmi časté.

V této práci se zaměřujeme především na infračervenou analýzu plynů, proto se jimi budeme zabývat detailněji.

2.3.1 Princip IR analýzy

Analyzátor obsahuje tři hlavní části: IR zářič, kyvetu a IR detektor. Předpokládejme, že zdroj IR záření se všemi vlnovými délkami. Budeme-li vpouštět záření do vakua, bude na detektor dopadat veškerá energie a naměříme maximální hodnotu např. napětí. Ve chvíli, kdy do kyvety vpustíme plyn schopný absorpce, pohltí část energie (přemění ji z největší části na teplo) a na detektoru naměříme nižší hodnotu napětí. Touto změnou výstupní hodnoty poznáme, že je v kyvetě plyn nebo směs více plynů.

K tomu, abychom zjistili, o jaký plyn se jedná, musíme postupovat o něco sofistikovaněji. U běžných plynů bylo experimentálně zjištěno či vypočítáno, které vlnové délky IR záření pohlcují nejvíce. Proto vpustíme do kyvety pouze jednu nebo určitý rozsah vlnových délek (pomocí vhodné filtrace) a zjistíme, o který plyn se jedná. V případě, že chceme zjistit koncentraci určitého plynu, budeme do měřeného prostředí vyzařovat pouze vlnové délky, které tento plyn absorbuje a měřit výstupní napětí detektoru.

Problém nastane, když jednu vlnovou délku absorbuje více složek měřené směsi. Proto ji musíme taktéž vyfiltrovat a změříme méně absorbované vlnové délky, které pohlcuje pouze měřený plyn.

Následující obrázek ukazuje, jak je možné analyzátory dělit.



Obr. 2. Dělení IR analyzátorů [2]

První dělení je dle zdroje záření. Buď jde o zdroj, který vyzařuje celé IR spektrum, tedy neselektivní emise, nebo jde o zdroj vyzařující pouze některé vlnové délky. U neselektivního zářiče se musí selektivity dosáhnout přídavnou filtrací a to buď autofiltrací nebo optickou filtrací (disperzí). Autofiltrační neboli bezdisperzní analyzátory se dále dělí na pozitivní a negativní filtraci, které budou popsány níže.

2.3.2 Analyzátor s (ne)selektivním zdrojem

Na zdroj záření jsou kladeny následující požadavky:

- 1. Vhodná spektrální vyzařovací charakteristika (vlnová délka, šířka pásma)
- 2. Maximální energetická účinnost (převod el. energie na emitovanou)
- 3. Stabilita krátkodobá i dlouhodobá (životnost)
- 4. Malé rozměry a vhodná směrová charakteristika
- 5. Příznivá cena

Analyzátor se selektivním zdrojem dnes používá nejčastěji IR LED a laserové diody. Výhodou selektivní emise je ten, že není potřeba filtrace záření, které dopadá na detektor. Další výhodou je možnost modulace záření do vysokých frekvencí až stovek kHz. Nevýhodou je fakt, že IR LED ani laserové diody neemitují kteroukoliv vlnovou délku. Například laserové diody pro IR spektrum se vyrábí pouze v několika vlnových délkách v rozmezí cca 700 až 2000 nm. Navíc, dioda s emisí na neobvyklé vlnové délce je drahá (až desetitisíce korun). IR LED jsou na tom s lasery srovnatelně (LED vyzařující na 1600 nm stojí řádově tisíce korun). Jestliže bychom chtěli použít pro měření plynu selektivní zdroj, museli bychom doufat, že plyn bude absorbovat na vlnové délce, s níž se selektivní zdroje vyrábí.

Neselektivní zdroj bývá užíván častěji. Jde většinou o žhavený odporový drátek (např. z wolframu) nebo tenkou vrstvu, který emituje záření typicky od 1 do 10 um. Tak velký rozsah má výhodu v tom, že s použitím správného filtru můžeme takové zdroje použít pro měření prakticky kteréhokoliv plynu. Nevýhodou může být právě nutnost filtrace či potřeba selektivního detektoru, Další nevýhody jsou vyšší příkon než u LED a laserů, modulace zdroje typicky pouze v řádu desítek Hz a životnost zářiče, která je max. 3 roky.

	Klady	Zápory
Selektivní zdroj	Vysoká energetická účinnost Vysokofrekvenční modulace Není třeba filtrů Životnost až 10 let	Malý rozsah λ Málá univezálnost Cena
Neselektivní zdroj	Velká univerzálnost Cena	Životnost cca 3 roky Pouze nízkofrekvenční modulace Potřeba filtrů či selektivních detektorů Nízká energetická účinnost

Tab. 1. Rozdíly selektivního a neselektivního zdroje

Pro naši práci jsme zvolili neselektivní zdroj záření a to především proto, že CO₂ nejvíce pohlcuje přibližně na 4,3 µm. Selektivní zářič pro takovou vlnovou délku by stál několik desítek tisíc korun.

2.3.3 (Bez)disperzní analyzátor

Přístroje s neselektivním zdrojem se dále dělí na disperzní (s optickou filtrací) a bezdisperzní (s autofiltrací).

Disperzní analyzátory jsou založené na rozkladu vlnových délek záření, kterým vzniká monochromatické světlo. Rozklad světla se provádí například hranolem, mřížkou nebo interferenčním filtrem. Do směsi se vpouští vlnové délky, které jsou měřeným plynem ovlivněné. Pohlcuje je pouze měřený plyn, ostatní plyny nemají na IR záření vliv, a my můžeme určit jeho množství. Disperzní analyzátory jsou konstrukčně složitější, obsahují přesně vložené mechanické části, a proto jsou velice náchylné na zacházení s nimi. Hodí se tedy především do laboratorních podmínek. Také jsou závislé na stabilitě světelného zdroje. Tyto nevýhody jsou však vyrovnány větší přesností, citlivostí a tedy spolehlivostí výsledků.



Obr. 3. Disperzní analyzátor

Bezdisperzní analyzátory jsou mnohem jednodušší a levnější (proto používanější), ale mají často horší selektivitu než disperzní. Do měřicího řetězce vchází celé IR spektrum, které buď dopadá na selektivní detektor, nebo se filtruje nejčastěji okénkem s velmi tenkými povrchovými vrstvami, které propouští jen úzké pásmo vlnových délek. Detektor tedy přijímá pouze vlnové délky, které nás zajímají.



Obr. 4. Bezdisperzní analyzátor

Bezdisperzní analyzátory se dále dělí na analyzátory s pozitivní a negativní filtrací, o čemž se píše v následující kapitole.

	Klady	Zápory
Disperzní analyzátor	Vysoká selektivita Vysoká citlivost	Složitost Náchylnost na zacházení Cena
Bezdisperzní analyzátor	Jednoduchost Robustnost Cena	Nízká selektivita Nízká citlivost

Tab. 2.Rozdíly disperzního a bezdisperzního analyzátoru

Pro výrobu přenosného zařízení jsme zvolili bezdisperzní metodu. Ačkoliv je méně citlivost a selektivní, neklademe na tyto vlastnosti velký nárok. CO₂ se totiž nepřekrývá s žádným jiným plynem Navíc lze zakoupit hotový detektor s vhodným filtrem v jednom pouzdře.

2.3.4 Pozitivní a negativní filtrace

Bezdisperzní analyzátory se dále dělí dle filtrace na pozitivní, nebo negativní.

Pozitivní filtrace znamená, že IR záření prochází zároveň dvěma kyvetami. V jedné z nich je plyn, který neabsorbuje IR záření. Ve druhé je námi měřená směs s plynem, který měříme. Za oběma těmito kyvetami je selektivní detektor záření, který pohlcuje pouze záření o vlnových délkách, které absorbuje i měřený plyn. Zatímco detektor za první kyvetou naměří maximální intenzitu v daných vlnových délkách, na druhý detektor je intenzita této vlnové délky oslabena o část pohlcenou v kyvetě se směsí, takže je výstupní signál detektoru menší. Rozdílem získáme velikost absorpce měřeného plynu.



Obr. 5. **Schéma bezdisperzního analyzátoru s pozitivní filtrací** (1 - IR zdroj; 2 – srovnávací kyveta; 3 – měrná kyveta; 4,5 – IR detektory)

Analyzátor s negativní filtrací má jiné schéma. IR záření prochází pouze jednou kyvetou naplněnou měřenou směsí. Za touto kyvetou se nacházejí paralelně další dvě kyvety, nebo optické filtry. Jedna kyveta (filtr), nic neabsorbuje, druhá kyveta (filtr) zachycuje vlnové délky, které nás zajímají. Dále záření dopadá na neselektivní detektory. Jeden detektor zachytí veškerou intenzitu, která prošla směsí. Druhý detektor přijme záření ochuzené o vlnové délky, které pohlcuje měřený plyn. Absorpci plynem získáme rozdílem těchto dvou naměřených hodnot.



Obr. 6. Schéma bezdisperzního analyzátoru s negativní filtrací (1 – IR zdroj; 2 - měrná kyveta; 3 - srovnávací kyveta; 4 - selektivní kyveta; 5,6 – IR detektory)



Obr. 7. a) celé spektrum; b) spektrum přijaté detektorem při negativní filtraci (bez vyšrafování); c) spektrum přijaté při pozitivní filtraci[2]

Z obrázku 7 vidíme rozdíl mezi signálem detektoru při pozitivní a negativní filtraci. Při pozitivní filtraci detektor přijme mnohem méně energie (pouze tu na měřených vlnových délkách), můžeme tedy říci, že relativní změny jsou u toho typu filtrace větší, tudíž je tento analyzátor citlivější.

	Klady	Zápory
Pozitivní filtrace	Citlivost	Potřeba selektivního detektoru Dvě optické cesty
Negativní filtrace	Jedna optická cesta	Potřeba filtrů Nižší citlivost

 Tab. 3.
 Rozdíly pozitivní a negativní filtrace

Pro naši práci jsme se rozhodli pro negativní filtraci. V malém přenosném zařízení by se dvě stejně dlouhé optické cesty pro pozitivní filtraci dělaly obtížně. Navíc u dvou optických cest hrozí rozdílné ovlivnění paprsků např. tuhými částicemi v plynu.

Neselektivní detektor pro negativní filtraci je levnější varianta. Je pravda, že jsou třeba optické filtry, ale vyráběné detektory je v už v sobě mají zabudované.

2.4 IR zdroje

IR zdroje můžeme rozdělit na selektivní a neselektivní.

2.4.1 Selektivní zdroje

První skupinou jsou selektivní zdroje. Do nich řadíme infračervené LED, laserové diody a lasery. Jejich společnou výhodou je vysoká energetická účinnost a možnost vysokofrekvenční modulace.

• IR LED

IR LED jsou polovodičové součástky, jejichž rekombinace v PN přechodu spontánně emituje IR záření. Používané materiály jsou např. GaAs, AlGaAs. Záření není koherentní, ale má relativně úzkou šířku pásma vlnových délek. Provedení, ve kterém se vyrábějí, není pro spektrální analyzátory vhodné. Jsou levné, ale vyrábí se pouze pro malý počet vlnových délek v blízkém IR spektru.



Obr. 8. Vlevo IR LED, vpravo obvyklá vyzařovací charakteristika [3,4]

• MID-IR LED

Existuje ještě další druh tzv. MID-IR LED, který je pro spektrální analýzu mnohem vhodnější. Vyrábějí se z materiálů např. AlGaAsSb nebo InGaAsSb. Je však těžké je zařadit z hlediska selektivnosti. Mají docela velkou šířku pásma (0,1 až 1 μ m na poloviční výkon), ale při pohledu na Obr. 9. vidíme značnou selektivitu. Jejich největší slabinou je vyzařovaný výkon, který se pohybuje v řádu desítek μ W (v pulsním modu při napájení až jednotkami A je výkon v jednotkách mW). Tyto diody se vyrábí pro vlnové délky přibližně od 2 do 7 μ m. Spektrální charakteristiky různých modelů se však velmi liší. Životnost takovýchto diod je asi 10 let, a jejich cena, vzhledem k životnosti, je celkem příznivá (cca 3-6 tisíc korun). Důvody, proč jsme tento zdroj nezvolili, jsou dva. Za prvé je to nízký výkon při velkém příkonu. Druhým důvodem je, že na vlnových délkách důležitých pro CO₂ téměř nevyzařuje.



Obr. 9. Charakteristiky MID-IR LED pro nižší (vlevo nahoře) a vyšší vlnové délky (vlevo dole) a MID IR LED [5, 27]

• Lasery

Dalším selektivním zdrojem je plynový laser, který má velkou koherenci, ale je velmi objemný pro možnost použití v přenosném přístroji. Podobně jsou na tom plynové výbojky.

Poslední možností selektivního zdroje je laserová dioda, která má díky dvojité heterostruktuře vyšší energetickou účinnost a užší spektrální čáru než LED (často užší než 1 nm). Je to způsobené stimulovanou emisí, která vzniká díky optické zpětné vazbě v zmíněné heterostruktuře. To jsou hlavní výhody laseru. Vyrábí se ve vlnových délkách 700 nm až jednotky µm. Je však třeba zmínit, že v tomto rozmezí jsou lasery laděny pouze na několik vlnových délek a navíc u méně obvyklých délek je to vykoupeno jejich vysokou cenou (laser nad 2 µm stojí přibližně sto tisíc korun). Vyrábí se i laser s laditelnou vlnovou délkou, s rozsahem až 100 nm, ale takové přístroje stojí až 250 tisíc korun.



Obr. 10. Laserová LED (vlevo), typické spektrum laseru (vpravo) [6]

2.4.2 Neselektivní zdroje

Druhou skupinou jsou neselektivní zdroje - tepelné zdroje. Jsou tvořené odporovým vláknem či vrstvou, nejčastěji z wolframu, konstantanu nebo tantalu. Jsou elektricky zahřívané na vysokou teplotu v řádu stovek stupňů Celsia, podle toho jaký výkon je třeba. Právě díky zahřátí na vysokou teplotu materiál emituje IR záření. Tepelné zdroje mají své výhody i nevýhody. Jsou robustní, mají velkou vyzařovací spektrální charakteristiku typicky od 1 do 10 µm, jsou jednoduché na výrobu a tedy i levné. Často bývají v ohnisku parabolického zrcadla, aby se veškerý výkon vyzařoval v úzkém svazku jedním směrem. Mezi jejich nevýhody patří především velká energetická spotřeba, velká teplotní závislost na vyzařovaném výkonu (je-li zdroj například vystaven závanu studeného vzduchu, dočasně se sníží jeho vyzářený výkon). Typickou vyzařovací charakteristiku můžete vidět na následujícím obrázku.



Obr. 11. Vyzařovací charakteristika tepelného zdroje záření [6]

• S vinutím

Tepelný zdroj může být v provedení vinutého odporového drátu. Je to již starší způsob, ale dodnes se takové zdroje používají. Výhodou tohoto zdroje je velká stabilita a možný velmi vysoký výkon v řádu jednotek až desítek W. Napájení se pohybuje v jednotkách A a V. I při takto velkém výkonu je životnost takovéhoto zářiče přibližně 3 roky. Nevýhodou je především nízká frekvence modulace, která bývá v řádu Hz, výjimečně deset Hz u provedení s menším výkonem. Tato volba je pro nás nevhodná: malá modulace, velká spotřeba na zbytečně velký výkon.



Obr. 12. Tepelný zdroj s odporovým drátem [15]

• S tenkou vrstvou

Zdroj v provedení tenké vrstvy o tloušťce cca jednotek mikrometrů je trochu odlišný od předchozího. Topný materiál je nanesen jako velmi tenká vrstva. Díky tomu, že je na

substrátu nanesen pouze velmi tenký film, může být vyzařování snáze modulováno. Podle tloušťky vrstvy je možné modulovat v řádu desítek Hz a u MEMS technologie až do sta Hz. Napájení je v řádu jednotek V a desítek či stovek mA, dle dimenzování vrstvy. Podle tloušťky může být výkon několik set mW až jednoty W. Životnost je opět přibližně 3 roky.



Obr. 13. Různá provedení tenkovrstvých tepelných zářičů [30,6]



Modulation Depth vs. Frequency

Obr. 14. Příklad závislosti modulační hloubky zářiče na modulační frekvenci [6] (Modulační hloubka udává, na jaký výkon se během sepnutého stavu dokáže zářič dostat v poměru s maximálním výkonem)

Pro náš návrh s neselektivním zdrojem jsme vybrali MEMS zářič, jelikož má nejmenší spotřebu, což je pro přenosný přístroj zapotřebí. Navíc nepotřebujeme vysoké výkony. Díky možnosti vysoké modulační frekvence se vyhneme používání rotující clonky.

2.5 IR detektory

Detektory dělíme na fotodetektory a tepelné detektory. Fotodetektory se dále dělí na intrinsické a extrinsické. Intrinsické dále fotovoltaické, které se chovají jako zdroj, a fotovodivostní, které mění svůj odpor. Rozdělení je názorně vidět v následující tabulce [13].

Тур		Detektor	Spektrální odezva (µm)	Provozní teplota (K)	
	Term	očlánkové	-	Záleží na	300
T 1 (Bo	lometry	-	okénku	
I epelne	T	lakové	Golayova cela		
	Pyro	elektrické	PZT,TGS,LiTaO ₃		
			PbS	1-3,6	300
		Fotovodivostní	PbSe	1,5-5,8	300
	rotovodrvostin	InSb	2-6	213	
			HgCdTe	2-16	77
	Intrinsické	Ge	0,8-1,8	300	
		InGaAs	0,7-1,7	300	
		Fotovoltaické	InAs	1-3,1	77
Fotodetektory			InSb	1-5,5	77
			HgCdTe	2-16	77
			Ge:Au	1-10	77
			Ge:Hg	2-14	4,2
	Extrincialsá		Ge:Cu	2-30	4,2
	EAU	IIIISICKU	Ge:Zn	2-40	4,2
			Si:Ga	1-17	4,2
			Si:As	1-23	4,2

Tab. 4. Rozdělení IR detektorů

2.5.1 Fotodetektory

Začneme fototodetktory. Ty jsou obecně mnohem citlivější než tepelné detektory. Jejich vlastnosti se mění díky dopadajícím fotonům. Fotony buď mění rezistivitu materiálu, jelikož excitují elektrony do vodivostního pásu, nebo vytvářejí napětí vnějším fotoelektrickým jevem. Fotodetektory se dále dělí na detektory s intrinsické a extrinsické.

Extrinsické se vyrábějí nejčastěji z Ge a Si. Mnohem lépe absorbují, jelikož elektrony potřebuji mnohem méně energie, aby se dostaly do vodivostního pásu (Obr. 15.) Jejich hlavní nevýhodou je, že nepracují při pokojové teplotě. Musí být chlazeny do velmi nízkých teplot, což je pro náš návrh naprosto nevhodné.



Obr. 15. Pásma fotodetektoru intrinsického (a) a extrinsického (b) [10]

Intrinsické jsou děleny na fotovoltaické a fotovodivostní.

Fotovoltaické

Fotovoltaické detektory mohou být vyráběny stejně jako IR LED, ale nejsou vhodné pro měření plynů. To proto, že absorbují úzký rozsah vlnových délek. Vhodnější je PIN dioda, kde "I" vrstva rozšiřuje PN přechod. To umožňuje absorbovat větší vlnové délky a také rozšiřuje šířku pásma. Například InGaAs PIN dioda je citlivá od 1 do 1,6 µm, což

je ale pro detekci CO₂ nevyhovující. Další materiály InSb nebo HgCdTe sice pokrývají námi sledované vlnové délky, ale opět je třeba jejich chlazení na velmi nízké teploty.



Obr. 16. InGaAs PIN Fotodioda FGA21 firmy Thorlabs (vlevo) a její spektrální charakteristika (vpravo, zelená čára) [6]

• Fotovodivostní

Fotovodivostní mají podobné neduhy jako fotovoltaické, tedy buď nevhodné rozsahy vlnových délek, nebo provozní teplota. PbSe lze provozovat při pokojové teplotě a pokrývá pro nás potřebné vlnové délky. Jejich cena není příliš vysoká (cca 5 tisíc korun). Aby se dosáhlo velkého výstupu a dobrého poměru signál/šum, napájecí napětí se musí pohybovat mezi 20 až 100 V, což není pro náš účel vhodné.



Obr. 17. Fotovodivostní detektor (vlevo) a jeho závislost výstupního signálu a šumu na napájení (vpravo) [6]

2.5.2 Tepelné detektory

Detailněji si přiblížíme tepelné detektory. Dopadající IR záření ohřívá materiál, který změnou teploty mění své vlastnosti, nebo vytváří napětí či proud. Jsou méně citlivé než fotodetektory, ale mohou pracovat za pokojových teplot. Nevýhodou tepelných detektorů je velká tepelná časová konstanta. Můžeme jimi detekovat pouze poměrně pomalé změny. Další společná vlastnost teplotních detektorů je možné použití pro široké spektrum vlnových délek. Omezení vlnových délek může způsobit jedině propustnost okénka senzoru. Okénko může být také potaženo tenkými vrstvami, které poté tvoří filtr, čímž se detektor stane selektivním.

• Golayova cela

Nejdříve se velmi krátce zaměříme na Golayovu celu. Jde o uzavřený prostor vyplněný plynem s velkou tepelnou roztažností. V něm je tenký film absorbující tepelné záření. Na film dopadající záření ohřeje plyn, který se roztáhne a vzniklý tlak zdeformuje pružnou zadní stěnu cely. Ta je z vnějšku potažená odrazivým materiálem. Deformaci této zadní membrány měříme odrazem laserového paprsku. Již z popisu je jasné, že jde o velmi složité a náchylné zařízení, které má velké rozměry a pro naše účely je zcela nevhodné. Abychom zmínily výhody, je to hlavně široké spektrum, na které cela reaguje.



Obr. 18. Golayova cela [14]

• Bolometr

Bolometr je v podstatě teplotně závislý odpor, potažený černou absorpční vrstvou. Jeho změna odporu se měří změnou napětí na odporovém děliči nebo v můstku. V dnešní době se vyrábí MEMS technologií v maticích a používá se často do termokamer. Jejich největší výhodou je jejich nízká cena a snadná výroba. Mají velkou citlivost a rozsah, ale některé typy se musí chladit.



Obr. 19. Bolometr

• Termočlánkové

Termočlánkové detektory využívají termoelektrického (Seebeckova) jevu – dva rozdílné spojené kovy (s rozdílným Seebeckovým koeficientem) se studeným a horkým koncem produkují napětí v uzavřeném obvodu. Napětí je úměrné rozdílu teplot těchto konců. Na horké konce dopadá IR záření, studené konce jsou připevněny k chladiči. Detektor má v sobě sérii mnoha takovýchto termočlánků, jak ukazuje obrázek.



Obr. 20. Zjednodušené schéma termočlánkového detektoru [17]

Vyrábí se zpravidla ve dvou provedeních – tenkovrstvé (Sb a Bi) nebo křemíkové (P a N křemík, nebo P křemík a N kov Au či Al). Rozdíly jsou vyčteny v následující tabulce.

	Tenký film	Křemík	
Výstupní napětí	+	-	
SNR	+	-	
Časová konstanta	-	+	
Cena	-	+	

Tab. 5. Vlastnosti dvou různých provedení termočlánkových detektorů

Mezi hlavní výhody termočlánkových detektorů patří možnost měřit jak změny IR záření, tak konstantní záření (např. pyroelektrické detektory měří pouze změny). Díky tomu bychom nemuseli vůbec řešit modulaci zdroje záření. Jejich velikou nevýhodou je velmi malá odezva (100x až 1000x menší než u pyrodetektorů), což je hlavní důvod, proč jsme termočlánkové detektory nevybrali.

• Pyroelektrické

Pyroelektrické detektory využívají, jak název napovídá, pyroelektrického jevu. To znamená, že použité materiály jsou schopny při změně teploty na svém povrchu generovat dočasný náboj. Ten vybudí napětí na připojených svorkách a obvodem začne téct proud.

Detektory jsou tvořeny tenkou vrstvou pyroelektrického materiálu např. LiTaO₃, polyvinylden fluoridu nebo triglycerid sulfátu, kterým je věnována samostatná kapitola. Tato tenká vrstva je pokryta černou absorbující vrstvičkou (nejčastěji černá platina, která pohlcuje do 10 µm přibližně 90 % IR záření), aby materiál pohltil více záření. Pyroelektrická vrstva je nanesena na substrátu, který funguje také jako chladič.



Obr. 21. Schéma pyroelektrického detektoru s můstkovou strukturou [11]

Tenký film pyromateriálu se nechává růst na podkladu. V ideálním případě by byl podkladem křemík, protože se dá skvěle mikroobrábět. Křemík je ale dobrý tepelný vodič, což je nežádoucí kvůli ovlivnění pyromateriálu okolím. Křemík navíc není vhodný pro růst filmů. Proto se nechá film pyroelektrického materiálu narůst na jiný substrát a poté se na křemík lepí. Kvůli tepelné vodivost křemíku se na něj nepřilepí přímo, ale vytvoří se vzduchová izolační vrstva pomocí membránové nebo můstkové struktury (Obr. 21.). Jedná se tedy o hybridní technologii.

Senzory se velmi často vyrábí s již zabudovanou teplotní a mechanickou kompenzací. Ta spočívá v tom, že se k filmu přijímajícímu IR záření přidá ještě jeden film. Ten je ovšem potažen vrstvou odrážející IR záření, čili na něj působí pouze změny okolní teploty. Odečtením signálu kompenzačního pyroelektrického filmu od signálu z absorbujícího filmu se detektor teplotně i mechanicky kompenzuje a je slepý k teplotním změnám okolí nebo působení tlaku (více o mikrofonním efektu bude řečeno později)



Obr. 22. Kompenzace změn teploty okolí, mechanického namáhání a mikrofonního efektu [23]



Obr. 23. Detail pyrodetektoru, černé plošky jsou absorbující filmy na pyromateriálu, světlé jsou odrazivé filmy na kompenzačních členech [25]

Přímo v pouzdře detektorů je integrovaný první zesilující stupeň. Jsou dvě možnosti zesílení. S J-FET tranzistorem, napěťový mód, a s operačním zesilovačem, proudový mód. Velikost výstupního signálu přímo úměrně závisí na velikosti použitého rezistoru zesilovače. Ten je typicky desítky až stovky G Ω (R_g u J-FET a R_z u OZ). Obě principiální zapojení jsou na následujícím obrázku.



Obr. 24. Pyrolektrický detektor (kompenzovaný) v zapojení s J-FET v napěťovém módu (vlevo) a s operačním zesilovačem v proudovém modu (vpravo) [8]

Tyto dva módy jsou rozdílné. Hlavní rozdíl je závislost napěťové odezvy na frekvenci. Napěťový mód má odezvu obecně mnohem menší navíc její vrchol je pod frekvencí 1 Hz, a poté již velmi strmě klesá. U proudového módu je výstup větší a vrchol je na několika Hz, navíc při malém zpětnovazebním rezistoru odezva s frekvencí skoro neklesá. V proudovém režimu je tedy možné měřit ve frekvencích až stovek Hz, což u napěťového módu nejde. Tento rozdíl je dán elektrickou časovou konstantou zapojení, která je u napěťového módu velmi dlouhá a dá se jen těžko ovlivnit. V proudovém módu se dá zmenšit snadno. Napěťový mód má ale nižší šum a detektor s ním je mnohem levnější.



Je třeba říci, proč je odezva tímto způsobem závislá na frekvenci. Je to dáno dvěma časovými konstantami. První je tepelná, která trvá desítky mS. Je určena především materiálem (tepelná kapacita a vodivost) a jeho množstvím v detektoru. Čím tenčí film, tím menší časová konstanta. Druhá menší časová konstanta patří zesilovači. Je závislá na velikosti (vstupního/zpětnovazebního) odporu zesilovače (J-FET/OZ) a kapacitou pyroelektrického materiálu. Vrchol napěťové odezvy leží vždy mezi těmito dvěma konstantami.



Obr. 26. Typická závislost napěťové odezvy na frekvenci [10]

Každý pyroelektrický detektor vykazuje šum. Celkový je součtem čtyř hlavních šumů. Jsou to: tepelný, mikrofonní, šum zesilovače a Johnsonův šum.

Tepelný šum je způsoben vibracemi nosičů náboje. Jako tepelný šum můžeme považovat i změny napětí vzniklé například změnou teploty celého pouzdra. Ten je kompenzován přidáním ještě jednoho záření neabsorbujícího pyroelektrického elementu, jak byl dříve řečeno.

Mikrofonní šum se objevuje hlavně ve vibrujícím či hlučném prostředí, jelikož každý pyromateriál je zároveň piezoelektrickým. Odstraňuje se stejně jako tepelný, nebo vibrace kompenzujícím zavěšením citlivého materiálu.

Šum zesilovače je dvojí: napěťový a proudový. Oba jsou dány kvalitou výrobního procesu (kontakty, délka spojů atd.).

Johnsonův šum je dominantní. Je způsoben náhodným tepelným pohybem nosičů náboje v pyroelektriku, který vytváří výkyvy napětí. Nedá se potlačit.

Pyroelektrický senzor jsme vybrali kvůli tomu, že je vhodný pro naše potřeby – je možné jej provozovat při pokojové teplotě, má teplotní kompenzaci, je relativně levný (dva tisíce korun v napěťovém módu), napájení je malé, absorbuje pro nás potřebné vlnové délky a vyrábí se i se dvěma kanály (s referenčním a měřicím okénkem).



Obr. 27. Dvoukanálový pyroelektrický senzor [24]

2.6 Pyroelektrické materiály

Pyroelektrické materiály patří do širší skupiny piezoelektrických materiálů. Můžeme tedy říci, že každé pyroelektrikum je piezoelektrikum, ale ne naopak.

Pyroel. jev nastává u všech materiálů, které mají alespoň jednu polární osu symetrie, kolem níž je dipólový moment.

Ferroelektrické materiály jsou podskupinou pyroelektrických materiálů. Orientace jejich polárních os může být změněna přiloženým elektrickým polem. U ferroelektrik je pyroelektrický jev největší.

Pyroelektrický jev je v podstatě vedlejším produktem piezoelektrického efektu. Materiál absorbuje tepelné IR záření, dojde k tepelnému mechanickému namáhání a vznikne elektrický náboj, protože na povrchu materiálu vznikne dočasná spontánní elektrická polarizace. Během této změny vznikne proud, který může být měřen na protilehlých stěnách materiálu.

Pyroelektrický jev je popsán rovnicí (5):

$$\Delta P = p * \Delta T \tag{5}$$

kde ΔP je změna spontánní polarizace, p je pyroelektrický koeficient (vztažený na plochu materiálu) a ΔT je změna teploty.

Proud vzniklý pyroelektrickým jevem má velikost dle rovnice:

$$i = A * p * \frac{dT}{dt} \tag{6}$$

kde A plocha elektrod na pyroelektriku.

Spojením předchozích rovnic získáváme rovnici:

$$i = A * \frac{dP}{dT} * \frac{dT}{dt}$$
(7)

ze které, díky poslednímu členu vidíme, že proud vzniká pouze při změně teploty v čase. Je to proto, že po ustálení teploty se povrchový náboj rozprostře po celé ploše materiálu a proud zmizí.



Obr. 28. Časový průběh výstupu detektoru v závislosti na změně intenzity IR záření [13]

U pyroelektrických materiálů si všímáme několika vlastností. Nejdůležitější je Curieova teplota. Důležitá je proto, jelikož pyroelektrický koeficient je tím větší, čím více se teplota materiálu blíží Curieově. Po jejím překročení je ale koeficient nulový a spontánní polarizace zmizí (dipóly ztratí svůj moment). Za Curieovou teplotou již není možné materiál používat jako detektor.



Obr. 29. Závislost spontánní polarizace a pyroelektrického koeficientu na teplotě [12]

Dalšími důležitými parametry materiálů jsou, permitivita, ztrátový činitel, tepelná vodivost a přirozeně pyroelektrický koeficient.

			při 1 kHz		
	T _c (K)	p (1/10 ⁴ cm ² K)	tan δ (-)	ε (-)	$\mathbf{F}_{\mathbf{v}}$ (m ² /C)
TGS	322	5,5	0,025	55	0,43
PVDF	455	0,27	0,15	12	0,1
LiTaO ₃	880	2,3	0,005	47	0,17
PZC	328	3,8	0,003	290	0,06
PTC	328	3,8	0,11	220	0,08

Tab. 6. Nejpoužívanější pyroelektrické materiály a jejich vlastnosti [13]

Triglycerid sulfát (TGS) je velmi často používaný, ale je křehký a není odolný vůči vodě kvůli jeho nízké Curieově teplotě. Má největší napěťovou odezvu (i přes velký ztrátový činitel), proto se používá ve vysoko výkonových zařízeních.

Lithium tantalát (LiTaO₃) je levný a přesto má dobré vlastnosti. Právě proto je také velmi často užívaným materiálem. Vyrábí se Czochralskyho metodou tvorby monokrystalu. Je snadno dostupný (tedy i levný), chemicky stabilní, není citlivý na vlhkost. Používá se tam, kde je třeba vysoká přesnost. Má malé ztráty, ale i malou odezvu.

Pyroelektrické keramiky (PZC – PbZrO₃ ; PTC – PbTiO₃) nejsou tak často užívané, jako předchozí dva materiály, ale i tak jsou celkem frekventované. Vyrábí se jako tenké destičky. Mají velký pyroelektrický koeficient a malé ztráty (ty jsou však velmi závislé na frekvenci). Jejich největším problémem je, že je není možné nanášet na křemík, protože s ním reaguje.

Senzor, který jsme použili pro náš přístroj, obsahuje lithium tantalát.

2.7 Optická cesta

Optická cesta je prostor mezi zdrojem IR záření a detektorem. Většinou obsahuje okénko zdroje (či okénko kyvety), kyvetu a okénko detektoru (často plnící filtrační funkci). Do této cesty také mohou přibýt i zrcadla, která použijeme v případě, kdy chceme zdelšit cestu, kterou IR záření urazí měřeným plynem.

2.7.1 Kyveta

Materiál kyvety musí vydržet tlak plynu, musí být chemicky stálý a nesmí mu vadit vlhkost. Pro nízké tlaky se používá sklo, pro vysoké nerezová ocel. Vnitřní povrch kyvet bývá potažen vrstvou odrážející IR záření. Často to bývá několik mikrometrů tenká vrstva zlata. Délka kyvet pro analýzu plynů se volí mezi 5 a 50 cm.

2.7.2 Okénka

Okénka, která jsou buď součástí kyvety nebo součástí zdroje či detektoru, se musí volit tak, aby co nejvíce propouštěla vlnové délky, které chceme měřit. Navíc musíme dát pozor, aby materiál okénka nereagoval s měřenou látkou. Některé materiály propouští sice široké pásmo vlnových délek, ale třeba jen z padesáti procent. V takovém případě někdy výrobce nabízí přidaní antireflexní vrstvy, která zvýší propustnost až na 95 % ale pouze pro jednu konkrétní vlnovou délku. Stručně si popíšeme pár nejpoužívanějších materiálů pro okénka.

Fluorid vápenatý (CaF₂) propouští 95 % v pásmu 0,2 až 8 μ m. Je mechanicky a teplotně velmi odolný. Se skoro žádnou látkou nereaguje.



Obr. 30. Vlnové délky propouštěné fluoridem vápenatým [6]
Safír propouští asi 90 % v pásmu 0,15 až 5 μm. Nevadí mu nízké ani vysoké teploty, stejně tak voda, kyseliny ani louhy. Je velmi tvrdý a nesnadno se poškrábe. Je levný.



Obr. 31. Vlnové délky propouštěné safírem [6]

Fluorid hořečnatý (MgF₂) má propustnost 95 % v rozsahu 0,2 až 6 μ m. Jeho jedinečná vlastnost je propustnost až 50 % na 120 nm, což nemá žádný jiný materiál. Je tedy použitelný jak pro UV, viditelné světlo, tak IR. Je mechanicky a teplotně odolný. Jeho cena je však více než dvojnásobná oproti jiným materiálům.



Obr. 32. Vlnové délky propouštěné fluoridem hořečnatým [6]

Fluorid barnatý (BaF₂) má velký rozsah 90 % propustnosti od 0,2 až do 11 μ m. Má podobné vlastnosti jako CaF₂, ale je méně odolný vůči vodě. Musí se s ním manipulovat v ochranných rukavicích.



Obr. 33. Vlnové délky propouštěné fluoridem barnatým (červeně) [6]

Synteticky vyráběný selenid zinečnatý (ZnSe) ze všech materiálů propouští největší rozsah délek od 0,6 až do 16 µm kde propouští 70 %. Snadno se poškrábe a je nutné jej brát v ochranných rukavicích. Cena je opět dvojnásobná oproti většině jiných materiálů.



Obr. 34. Vlnové délky propouštěné selenidem zinčnatým [6]

Velmi často používané pro IR oblast je germanium (Ge), které má propustnost asi 45 % od 2 do 16 μ m. Je odolný vůči vzduchu, louhům, kyselinám i vodě. Propustnost je velmi závislá na teplotě (při 200 °C už vůbec nepropouští). Manipulace pouze v ochranných rukavicích.



Obr. 35. Vlnové délky propouštěné germaniem [6]

Dalšími materiály jsou N-BK7 (90 % od 0,35 do 2 μ m), tavený křemen (95 % od 0,19 do 2,1 μ m) a křemík (55 % od 1,2 do 8 μ m)



Obr. 36. Přehled propustností všech častých materiálů pro okénka [13]

2.7.3 Filtry

Filtry se často aplikují přímo na okénka detektoru. To se dělá proto, aby tepelné neselektivní detektory reagovaly jen na určitě vlnové délky. Tím se stávají selektivními.

V dnešní době se filtry dělají nejčastěji napařováním velmi tenkých vrstev na sklíčko. Na okénko se střídavě nanáší tenký film s vysokým a nízkým indexem lomu. Mezi těmito vrstvami dochází k odrazům a interferencím záření. Šířka vrstvy určuje, jaké vlnové délky sklíčkem projdou a které se interferenčně vyruší.



Obr. 37. Funkce tenkovrstvého filtru [29]

Pokoušeli jsme se dohledat materiály, ze kterých se tyto vrstvy vyrábí, ale zdá se, že to je výrobní tajemství firem, které se výrobou filtrů zabývají. Firmy většinou nabízí širokou škálu filtrů na vlnové délky, které jsou zásadní pro měření plynů.

Typ filtru	Použití	Střední vlnová délka (µm)	Šířka pásma (nm)
G1	CO	4,64	180
G2	CO_2	4,26	180
G2.2	CO_2	4,43	60
G2.5	CO_2	4,33	160
G3	CO+CO ₂	4,48	620
G4	NO	5,30	180
G5	HC	3,35	190
G5.1	HC	3,46	163
G5.2	HC	3,30	160
G20	Reference	3,95	90

Obr. 38. Ukázka filtrů nabízející firma Perkin Elmer [7]

Všechny firmy vyrábějí referenční filtr pro vlnovou délku 3,95 µm. Je to proto, že žádná běžná látka v této vlnové délce neabsorbuje.

Toto byly fixní filtry. Další možný filtr je laditelný Fabry-Perotův, kterým se budeme zabývat v další kapitole.

3 Pyroelektrický senzor plynu s laditelným filtrem

3.1 Úvod

Fabry-Perotův interferometr (FPI) je tvořen dvěma polopropustnými zrcadly. Jejich nastavením můžeme filtrovat různé vlnové délky. Za tímto filtrem je pouze jeden snímač, což je výhoda oproti lineárně proměnnému filtru (LVF), který jich má celé pole. Výhoda je také v jednoduchém vyhodnocení naměřených dat. Oproti LVF totiž můžeme, když nás ostatní nezajímají, měřit pouze jednu vlnovou délku. Zpracování výsledků je pak mnohem snazší. Určení měřícího rozsahu a kroku FPI může urychlit měření.

3.2 Fabry-Perotův filtr

Laditelný filtr je založen na známém Fabryho-Perotově Interferometru (FPI). Dvě plochá polopropustná zrcadla, charakterizována odrazivostí R a absorbancí A, jsou uspořádána paralelně ve vzdálenosti d a tvoří optický rezonátor s indexem lomu n (Obr. 39 vlevo).



Obr. 39. Schématické sestavení a funkce propustnosti Fabry-Perotova interferometru [33]

Paprsek s intenzitou I_0 , dopadající pod úhlem β , se v rezonátoru odráží tam a zpět. Interference mezi více paprsky vytváří po sobě jdoucí vrcholy propouštěného spektra $T(\lambda)$ F-P filtru (Obr. 39. vpravo) popsané Airyho vzorcem

$$T(\lambda) = \frac{I_t}{I_0} = \frac{T_{max}}{1 + Fsin^2 \left(\frac{2 \pi n d \cos\beta}{\lambda}\right)}$$
(8)

kde je vrchol propustnosti

$$T_{max} = \left(1 - \frac{1}{1-R}\right)^2 \tag{9}$$

a jemnost

$$F = \frac{4R}{(1-R)^2} \tag{10}$$

Po sobě jdoucí vrcholy propustnosti různých interferencí m se nachází na vlnových délkách, pro které je splněna rezonanční podmínka

$$\lambda_m = \frac{2 \, n \, d \, \cos\beta}{m} \tag{11}$$

FPI může být použit jako laditelný úzkopásmový filtr v případě, že mezera rezonátoru *d* lze nastavit na propouštění vlnové délky λ_m v daném spektrálním pásmu.

3.3 Provedení filtru

Konstrukce detektoru s laditelným filtrem je znázorněna na Obr. 40. Využívá relativně silné zrcadlové nosiče. Jeden z nich je fixní a druhý je zavěšen na pružinách, které umožňují vertikální pohyb. Zrcadla s nízkým zakřivením zaručují vysokou jemnost a vysokou světelnost. Tato Braggova zrcadla jsou navrstvena na tlustých křemíkových nosičích. Zadní strany jsou pokryty antireflexní vrstvou. Pohyblivý a pevný nosič zrcadla jsou spojeny buď přímým křemíkovým lepením nebo SU-8 mezivrstvou.



Obr. 40. Princip designu detektoru s laditelným filtrem [32]

Pevné zrcadlo se nachází uprostřed a je obklopené řídícími elektrodami. Pohyblivé zrcadlo je tlumeno diagonálně uspořádanými pružinami umístěnými v rozích vnějšího rámu. Pružiny, které jsou znázorněny na následujících obrázcích, byly vyrobeny optimálně s ohledem na maximální rozsah ladění, nízký vliv gravitace, nízkou odchylku rovnoběžnosti zrcadla při mechanickém namáhání a nízkou složitost výroby. Vnější části nosiče pohyblivého zrcadla slouží jako pohyblivé elektrody.



Obr. 41. Destička nosiče pohyblivého zrcadla vyrobené suchým leptáním (vlevo) a detail pružiny s prvkem kompenzujím namáhání v podélném směru (vpravo) [32]

Design paralelních pružin je téměř ideální pro pohyb ve vertikálním směru.. T-tvar umožňuje příjem pnutí v podélném směru.

3.4 Provoz filtru

K ladění filtru (změna vzdálenosti polopropustných zrcadel) se používá elektrostatické ovládání. Takové ovládání se dá snadno integrovat. Existují i piezoelektrické pohony, které mají větší sílu, ale jsou těžko integrovatelné.

Závislost napětí a propouštěné vlnové délky má typickou odmocninou funkci elektrostatického pohonu. Snížená propustnost při ladění je výsledkem naklápění pohyblivých zrcadel.

Maximální napětí nesmí být nikdy překročeno, jinak může být zařízení nevratně poškozeno. Kromě toho, musí být zachována polarita ovládacího napětí.



Obr. 42. Spektrální propustnost (vlevo), šířka pásma a střední vlnová délka (vpravo) F-P filtru v závislosti na napětí [32]

Řídící elektroda ($_{+}Vc$) je připevněna na pevném nosiči zrcadla, zatímco pohyblivý nosič zrcadla slouží jako elektroda s pevným V_{cref} referenčním napětím. Použití ladicího napětí $Vc = _{+}Vc - Vcref$ má za následek elektrostatickou sílu F_{el} zmenšující mezeru mezi elektrodami d_{el}

$$F_{el} = \frac{\varepsilon_0 A_{el} V_c^2}{2d_{el}^2} \tag{12}$$

Bohužel, kvůli některým nelinearitám je skutečná poloha zrcadla, a tím i filtrovaná vlnová délka, trochu jiná, než vypočítaná. Toto chování má za následky některá praktická omezení:

 Filtr je citlivý na zrychlení: na vibrace (dynamický případ) a na polohy s ohledem na zemskou přitažlivost (kvazi statický případ)

Chování filtru závisí na nastavené vlnové délce

■ Filtrovaná vlnová délka může být posunuta s teplotou v důsledku tepelné roztažnosti distanční vrstvy.

Interferenční filtry jsou obecně náchylné na teplotní posun, který je částečně způsoben čistě mechanickým rozšířením dielektrických úzkých filmů a částečně změnou optických konstant materiálů. V případě laditelných F-P filtrů je teplotní posun způsoben hlavně roztažností distanční vrstvy.

3.5 Konstrukce senzoru

Laditelný filtr je umístěn v horní části pyroelektrickém detektoru viz Obr. 43. Transimpedanční zesilovač (TIA) je připojen k začernělému $2x2 \text{ mm}^2$ pyroelektrickému čipu z lithia tantalátu. Druhý čip, který je spojen anti-paralelně a je chráněn před zářením, kompenzuje signály způsobené teplotními změnami v okolí. OZ pracuje s minimálním napájecím napětím ± 2,2 V a klidovým proudem 70 µA. Nízký ztrátový výkon má za následek velmi krátkou zahřívací dobu (několik sekund). Zapojení detektoru je zobrazeno na Obr. 44.

Jak laditelný filtr, tak detektor jsou v jednom TO-8 pouzdře se širokopásmovým filtrem.



Obr. 43. Schéma a obrázek laditelného pyroelektrického detektoru s laditelným filtrem [32]



Obr. 44. Zapojení pyroelektrického detektoru s laditelným filtrem [32]

3.6 Řízení senzoru

Zisk a maximální řídící napětí by měly být zvoleny podle typu filtru. Časová konstanta jakékoliv elektrické filtrace by měla být tak vysoká, jak je to jen možné, ale neměla by překročit mechanické časové konstanty, aby nebyl ovlivněn mechanický výkon filtru.

V závislosti na zadání měření a provoznímu režimu mají senzory s F-P filtrem různé výhody ve srovnání s konvenčními jedno nebo vícekanálovými detektory s pevnými filtry.

Tři různé provozní režimy vysvětlíme podrobně:

Posloupnost kanálů

V nejjednodušším případě může být několik stacionárních kanálů detektoru nahrazeno laditelným detektorem. Filtr je postupně přizpůsoben individuálním kanálům. To má kromě vyšší flexibility i další výhody:

■ Jednoduché vícekanálové detektory mají oddělené otvory, které jsou nerovnoměrně osvětleny, znečištěny atd. Senzor s laditelným filtrem nemá tyto problémy díky konstrukci a jednotné světelné dráze.

■ Detektory s vnitřním děličem paprsků mají také společný otvor, ale každý kanál dostane jen část celé vyzařované energie. Uplatněním sekvenčního měření můžeme použít vždy celý zářivý výkon. Tím může být dosaženo až zdvojnásobeného SNR.

Krokové skenování

Výše popsaná metoda může ještě být rozšířena tak, že lze získat kontinuální spektrum. Požadovaná doba snímání pro mapování spektra závisí na následujících skutečnostech:

Počet měřicích bodů (rozsah vlnových délek, velikost kroku)

■ Záznamy měřicích bodů (modulační frekvence, integrační čas):

Tyto parametry definují SNR. Kromě vlastností detektoru a použité metodě analýzy, je zásadní i tok záření, hloubka modulace IR zdroje a design měřicího obvodu.

Doba ustálení filtru:

Skutečná doba ustálení filtru závisí na vlnové délce, jak je popsáno výše. Měla by proto být provedena různě, aby byla dosažena optimální rychlost.

Kontinuální snímání (Sweep režim)

Pomocí pyroelektrického detektoru může být analyzováno pouze modulované záření. Za normálních okolností je tento způsob realizován rotační clonou nebo elektrickou modulací IR zdroje. Nicméně, v případě, že je filtr postupně skenován (sweepován) spektrální informace mohou být přímo použity pro modulaci. Filtr je v tomto případě poháněn dynamicky. Tento provozní režim může velmi urychlit záznam spekter. Používá se ale pouze pro informativní měření.

Ovládání senzoru je snadné díky dodávanému programu a vývojové desce. Tu stačí napájet ze zdroje stejnosměrného napětí a připojit k počítači pomocí USB. Poté nainstalovat ovladače a program, kterým lze senzor řídit velice snadno. Program umožňuje například: definovat kalibrační hodnoty, zvolit mód měření, frekvenci modulace IR zdroje, proud IR zdrojem, zisk detektoru a tak dále. Naměřené hodnoty lze ukládat do textového souboru.

3.7 Měřicí aparatura



Obr. 45. měřicí aparatura

3.8 Měření se senzorem s F-P filtrem

Na LFP-3041L-337, senzoru plynů s filtrem laditelným od 3 do 4,3 µm, jsme měřili skupinu látek. Nejčastěji to byly hydro-karbony, protože absorbují právě mezi 3 a 4 µm. Používali jsme režim krokového skenování, tedy změření celého rozsahu s nejmenším krokem, který senzor dovoluje, 10 nm. Nejprve jsme měřili vliv vlhkosti, jelikož výrobce uvádí, že na ni senzor nereaguje. Poté jsme měřili plyny pro dva konstantní průtoky, dvě konstantní koncentrace a dvě délky kyvety.

3.8.1 Měření vlhkosti

V první sadě měření jsme zjišťovali, jak senzor reagoval na změnu vlhkosti. Podle výrobce by nijak reagovat neměl. Postup měření byl následující: 2 minuty čištění a 4 minuty snímání pro 3 různé vlhkosti.

Po měření jsme zjistili, že vlhkost plynu skutečně nemá žádný vliv na měření. Je to způsobeno tím, že vodní pára v oblasti vlnových délek od 3 do 4,3 µm neabsorbuje.

3.8.2 Měření s konstantním průtokem

Ve druhém měření jsme nastavili průtoky látky vždy na 10 a 20 ml/min (detaily v příloze). Vždy probíhalo 5 minut čištění dusíkem a 2 minuty snímání spektra.

První dvojice grafů ukazuje výstup ze senzoru. Druhá dvojice ukazuje rozdíl spekter pozadí (N_2) a měřené látky.



Obr. 47. Výstupní signál senzoru při průtoku 20 ml/min



Obr. 48. Rozdíl výstupního signálu pro dusík a měřené látky při průtoku 10 ml/min



Obr. 49. Rozdíl výstupního signálu pro dusík a měřené látky při průtoku 20 ml/min

3.8.3 Měření s konstantní koncentrací

Další měření proběhlo za konstantních koncentrací. Jedno měření pro 5000 ppm a druhé pro 10 000 ppm. Toho jsme dosahovali tak, že průtok měřené látky jsme nechali vždy 10 ml/min a ředili jej dusíkem tak, aby vycházela vždy stejná koncentrace plynu (detaily v příloze). Vždy probíhalo 5 minut čištění dusíkem a 2 minuty snímání spektra.

První dvojice grafů ukazuje výstup ze senzoru. Druhá dvojice ukazuje rozdíl spekter pozadí $(\rm N_2)$ a měřené látky.



Obr. 51. Výstupní signál senzoru při koncentraci 10 000 ppm



Obr. 52. Rozdíl výstupního signálu pro dusík a měřené látky při koncentraci 5 000 ppm



Obr. 53. Rozdíl výstupního signálu pro dusík a měřené látky při koncentraci 10 000 ppm

3.8.4 Měření s dlouhou cestou

Toto měření bylo opět pro konstantní koncentraci a to 10 000 ppm. Opět probíhalo vždy 5 minut čištění dusíkem a 2 minuty snímání. Na rozdíl od předchozích měření, kdy měla kyveta délku 8 cm, nynější měrná kyveta měřila 16,5 cm.

	Maximální pokles signálu (%)		
Látka	krátká kyveta	dlouhá kyveta	
Isopropanol	52.4	49.6	
Toluen	36.2	44.3	
Methanol	28.6	39.1	
Benzen	34.3	47.8	
Aceton	27.6	35.7	
Cyklohexen	68.6	77.4	

Tab. 7.Procentuální pokles naměřeného výstupního signálu pro dlouhou a krátkou
kyvetu

Tab. 7. ukazuje, že při měření s dlouhou kyvetou se procentuální pokles signálu zvětší (mimo isopropanolu). To znamená, že absorpce plynem je u delší kyvety větší. Z toho vyplývá, že čím delší kyveta je, tím menší koncentrace jsme schopni měřit.

Na následujících grafech je vidět rozdíl mezi kratší a delší kyvetou. Maximální hodnota signálu přijímaného při měření s delší kyvetou je samozřejmě menší. Proto mají grafy rozdílné měřítko svislé osy, ale mají stejné rozměry, takže je vidět poměrný rozdíl.



3.8.5 Další modifikace

V budoucnu je možné dělat další charakterizaci senzoru, například měření:

- sloučenin látek, které jsme doposud měřili jednotlivě
- při různých teplotách
- s mnohonásobným prodloužením optické cesty pomocí zrcadel
- s kratší integrační dobou detektoru
- s vyšší/nižší frekvencí modulace IR zdroje
- v různých polohách (změna působení gravitace na pohyblivé zrcadlo), či za vibrací

4 Přenosný senzor oxidu uhličitého

4.1 Úvod

Další praktickou částí mé práce bylo na základě poznatků z teorie ve druhé kapitole vytvořit přenosný senzor oxidu uhličitého. Toto zařízení k detekci využívá IR spektroskopie s pomocí pyroelektrického detektoru. Přístroj umožňuje napájení jak ze sítě, tak z baterií. Mimo koncentrace oxidu uhličitého měří také teplotu a vlhkost vzduchu. Je malý, lehký a snadno ovladatelný. Přístroj je možné připojit k PC a exportovat uložené naměřené hodnoty v textovém formátu. Také je možné kdykoliv aktualizovat a vylepšovat jeho program.

V následujících kapitolách budou detailněji popsány funkční bloky přístroje.

4.2 Mikrokontroler LPC1768 – Mbed

Jádrem přístroje, který řídí všechny procesy spojené s měřením koncentrace oxidu uhličitého, je mikrokontroler LPC1768 od firmy NXP. Ovládá buzení IR zdroje, snímá výstup z pyroelektrického detektoru a snímače vlhkosti a teploty. Řídí LCD, vhánění plynu do optické cesty a ukládání naměřených dat do vnitřní paměti.

Abychom si usnadnili práci, použili jsme vývojový prostředek Mbed, který je určený k rychlému prototypování. Výhodnou tohoto řešení je především snadné a okamžité použití. Navíc má tato platforma velké množství uživatelů, kteří sdílejí své programy jako knihovny k mnoha elektronickým zařízením, které se k Mbedu dají připojit. Tyto knihovny nám také usnadnili práci (například ovládání LCD či SHT), takže jsme se nemuseli tolik soustředit na programování, ale na samotný návrh zařízení.

Na Mbedu jsme využili stabilizovaný výstup 3,3 V pro napájení většiny aktivních součástek přístroje, dva A/D převodníky pro snímání výstupu pyroelektrického detektoru a porty na ovládání IR zdroje, ventilátoru, LCD a SHT.

Mikrokontroler také zajišťuje ukládání dat v textovém formátu. Data obsahují čas, naměřenou teplotu a vlhkost a rozdíl maximálních hodnot z referenčního kanálu a kanálu citlivého na CO_2 .

Program nabízí ukládat do tří různých souborů, abychom mohli provést více měření bez přepsání předchozích dat. Ukládají se pouze ta nejdůležitější data, aby se neplýtvalo pamětí mikrokontroleru a bylo možné ukládat i dlouhodobá měření. Vnitřní paměť mikrokontroleru dovoluje uložit data za pět hodin měření.

Celou platformu Mbedu je možné opakovaně vložit a vyjmout do/z plošného spoje. Možným budoucím rozšířením mého přístroje je oprostit se od tohoto vývojového přípravku a použít pouze mikroprocesor LPC 1768. Sníží se tím cena i rozměry přístroje.



Obr. 56. Vývojová platforma Mbed s mikrokontrolerem LPC1768 [44]

4.3 Pyroelektrický detektor

Pyroelektrický detektor jsme zvolili LHI 814 od firmy Perkin Elmer. Je to dvoukanálový senzor s teplotní kompenzací, který se vyrábí s již zabudovanými filtračními okénky. Vybrali jsme typ, který má jeden filtr určený pro měření oxidu uhličitého a druhý vhodný jako referenční.

Referenční kanál má dvě funkce. Zaprvé odstraňuje zkreslení měření způsobené možnými prachovými částečkami v optické cestě a zadruhé odstraňuje zkreslení zaviněné kolísáním výkonu IR zdroje. Uděláme-li rozdíl výstupního signálu citlivého a referenčního kanálu, nemusíme tyto problémy řešit.

Senzor pracuje v napěťovém režimu (viz obrázek), takže vyžaduje pomalejší modulaci buzení a větší zesílení jeho výstupního signálu. Je ale levný.



Obr. 57. LHI 814 a jeho vnitřní zapojení [45]

4.3.1 Zesilovač pro pyroelektrický detektor

Změny výstupního signálu z detektoru LHI 814 jsou v řádech mV, a proto je třeba zapojit na jeho výstupy zesilovač. Vycházeli jsme ze zapojení uvedeného v publikaci firmy InfraTec zvané Detector Basics [40]. V ní k zesílení signálu doporučují aktivní pásmovou propust, která potlačuje nízké frekvence (pomalá změna teploty v místnosti) a vysoké frekvence (vysokofrekvenční šum). Jejich zapojení jsme upravili k našim potřebám – zvýšili jsme zesílení a snížili horní mezní kmitočet.



Obr. 58. Schéma aktivní pásmové propusti

Schéma zapojení je na obrázku 58. Dolní mezní kmitočet dán vztahem (13)

$$f_d = \frac{1}{2\pi * R_1 * C_1}$$
(13)

a horní mezní kmitočet podobně.

$$f_h = \frac{1}{2\pi * R_2 * C_2} \tag{14}$$

Zesílení středního kmitočtu se vypočítá vzorcem (15).

$$A_u = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$
(15)

Rezistory jsme zvolili tak, aby při zesílení nedocházelo k saturaci zesilovače. Použité kondenzátory definují $f_d = 1$ Hz a $f_h = 10,3$ Hz. Při tomto nastavení jsme naměřili nejlepší vlastnosti zesilovače tedy: velké zesílení, malé rozkmity způsobené např. závanem větru na senzor, a malé zesílení vysokofrekvenčního šumu obvodu způsobeného např. pulzním buzením IR zdroje. Nevýhodou zapojení je, že při prvním měření trvá asi 15 sekund, než se nabijí použité kondenzátory ve zpětných vazbách a zesilovač začne pracovat.

4.3.2 Snímání signálu z pyroelektrického detektoru

Ze zesilovače jde výstupní signál na vstupní pin mikrokontroleru, který slouží jako analogově digitální převodník. Rozlišení převodníku je 12 bitů. Každou periodu vybuzení senzoru se uloží deset naměřených hodnot (počet se dá softwarově změnit). Z těchto hodnot se poté nalezne maximum. Tento proces je shodný jak pro kanál citlivý na oxid uhličitý, tak pro referenční. Po nalezení maxima pro CO_2 a referenční kanál se tyto dvě nejvyšší hodnoty odečtou a z rozdílu se určí koncentrace oxidu uhličitého v plynu.

4.4 Zdroj IR záření a jeho řízení

Jako zdroj infračerveného záření byl použit MIRL17-900 od firmy Intex. Pravdou je, že tento zdroj není do přístroje ideální. Zakoupit se dají i vhodnější zdroje s nižší spotřebou, ale doba jejich dodání mohla být několik týdnů, a proto byl použit zdroj, který jsme již v laboratoři měli k dispozici.



Obr. 59. Schéma budiče IR zdroje

Zapojení pro buzení zdroje jsme použili ze stejného dokumentu [40] jako u zapojení senzoru. Tranzistor pracuje jako spínač, který je řízený napětím U_{in} . U_{in} je připojeno k vývodu mikrokontroleru. Ten po 0,5 sekundě mění na výstupním pinu logickou nulu a jedničku. Zdroj je tedy buzen s periodou 1 Hz a střídou 50 %. Toto nastavení se dá kdykoliv programově změnit, ale je to zbytečné. Experimentálně jsme zjistili, že pro kratší časy nestihne vystoupat pyroelektrické napětí na maximum, a pro delší časy toto napětí začíná před přepnutím klesat, takže už je nemá smysl snímat. Navíc s delším časem sepnutí roste spotřeba IR zdroje. Doba půl sekundy zapnutí/vypnutí je vhodná také proto, že senzor ukládá naměřená data právě každou sekundu.



Obr. 60. MIRL17-900 [46]

4.5 Řízení proudění plynu

Aby byla odezva na změnu koncentrace CO_2 v měřeném prostředí rychlá, je vhodné plyn do optické cesty vhánět. Čekání, než se plyn samovolně dostane mezi zdroj záření a detektor, by mohlo být zdlouhavé.

Pro tento účel by byla ideální mikropumpa, které se vyrábějí a dají se zakoupit. Vzniká zde ale stejný problém jako u zdroje IR záření a to, že bychom čekali více než měsíc, než bychom ji dostali do rukou. Navíc by byla cena takové pumpy jistě vysoká.

K tomuto účelu jsme se rozhodli použít miniaturní ventilátor o velikosti 15x15 mm s malou spotřebou 2-3,5 V a maximální proud 36 mA. Jeho buzení je shodné s buzením IR zdroje. Jediným rozdílem je předřadný odpor, který snižuje zbytečně vysoké otáčky, a tím snižuje i spotřebu.



Obr. 61. Schéma budiče ventilátoru

4.6 Optická cesta

Optická cesta je řešena spojením několika dílů ze slitiny hliníku, které tvoří trubici o délce cca 7 cm, na jejíž kraje je připevněn senzor a IR zdroj. Trubice má dva vývody pro proudění plynu. Zevnitř je pozlacená metodou naprašování, aby se od stěn lépe odrážely infračervené paprsky.

Návrh byl proveden v programu SolidWorks, obrábění a vrtání na FEL ČVUT a pozlacení na VŠCHT.



Obr. 62. Návrh pozlacené středové (vlevo) a krajní (uprostřed) části měrné kyvety a jejich sestava (vpravo)

4.7 Měření teploty a vlhkosti

Přístroj umí měřit okamžitou teplotu a vlhkost vzduchu. To umožňuje senzor SHT15 od firmy Sensirion. Tento integrovaný obvod komunikující protokolem podobným I2C poskytuje data o teplotě a vlhkosti okolního vzduchu přímo v 12bitové digitální formě.



Obr. 63. Schéma zapojení SHT15

Programové ovládání tohoto senzoru nám velmi usnadnila knihovna pro něj určená. Stačilo ji implementovat do našeho programu a využívat její funkce. Každou sekundu ze senzoru vyčítáme teplotu a vlhkost, jejichž hodnoty ukládáme do paměti.



Obr. 64. Senzor SHT [46]

4.8 Zobrazovač

Jako zobrazovač jsme použili LCD Nokia 6610. Je to barevný displej s rozlišením 132x132 pixelů, s nízkou spotřebou a napájením pouze 3,3 V (za použití zvyšujícího DC/DC měniče) a je ovládaný SPI komunikací. Tento model byl zvolen proto, že je velmi oblíbený mezi uživateli, takže lze koupit modul, který je připraven k okamžitému použití. Navíc opět existují knihovny na jeho ovládání, takže jsme se nemuseli moc dlouho zabývat programem, který by jej řídil.

Schéma zapojení je uvedeno v přílohách.

4.9 Napájení

Přístroj může být napájen dvěma způsoby. Většinu času bude napájen ze čtyř AA baterií, které mají společně napětí 4,8 V a kapacitu 2700 mAh. Na jedno nabití by přístroj měl fungovat přibližně 9 hodin.

Druhou možností napájení je z 5 V zásuvkového adaptéru. V momentě připojení tento adaptér zároveň napájí celý přístroj a také dobijí baterie. V případě, že jsou baterie nabité, a přesto chceme využívat napájení z adaptéru, je třeba baterie vyndat, protože přístroj neobsahuje žádný obvod starající se o ukončení nabíjení baterií po jejich plném nabití. Je to možné vylepšení do budoucna.

Vnitřní obvody jsou napájeny buď přímo z baterií/adaptéru a nebo z pinu Mbedu, který poskytuje 3,3 V stabilizovaného napětí.

4.10 Krabička

Při volbě krabičky, v níž bude zařízení umístěno, jsme nejprve uvažovali o plechové. Poté jsme přešli k volbě plastové, protože je levnější, snáze se dá upravit a nemusí se řešit izolace.

Jako nejvhodnější se nám zdála krabička 1553TGYBAT od firmy Hammond Electronics. Má vhodné rozměry a tvar, není příliš drahá a navíc má hotový box na uložení baterií.

V dolní části krabičky se nacházejí baterie, ve středu plošný spoj s řídicími obvody a v horní části je měrná kyveta. Nasávání plynu pomocí ventilátoru je v samotném vršku Bakalářská práce 2014 45 krabičky. V boční stěně jsou otvory pro USB a napájení adaptér. Celé řešení přibližně ilustruje následující 3D model vytvořený v programu VariCAD Trial (Obr. 65.)



Obr. 65. Pohled na vrchní část (vlevo) a vnitřek (vpravo) přístroje

4.11 Blokové schéma

Zjednodušené zapojení všech jmenovaných částí přístroje ilustruje následující obrázek s blokovým schématem.



Obr. 66. Blokové schéma přístroje

4.12 Vývojový diagram programu mikrokontroleru

Na následujícím obrázku je zjednodušený vývojový diagram řídícího programu.



Obr. 67. Vývojový diagram řídícího programu

4.13 Naměřené hodnoty a vlastnosti

První provedené měření proběhlo ještě před sestavením přístroje. Tímto měřením jsme zjišťovali, zda je zapojení, které bylo realizováno prozatím na nepájivém poli, vhodné. Po pětiminutových intervalech jsme do optické cesty pouštěli syntetický vzduch a poté oxid uhličitý o koncentraci 5 000, 2500 a 1250 ppm. Průběh výstupního napětí je vidět na Obr. 68. Je třeba upozornit, že měření bylo pouze orientační a nelze z něj dělat závěry např. o citlivosti.



Obr. 68. Výstupní napětí ze senzoru při pokusném měření

4.14 Základní parametry

Napájení: Adaptér 5 V nebo 4x AA baterie 1,2 V Výdrž při napájení z baterií: cca 9 hodin (průměrná spotřeba 300 mA) Rozměry přístroje (VxŠxH): 210x100x32 mm Výstupy: USB

4.15 Návrh dalšího postupu

Vyrobený přístroj je pouze prototyp, a proto se nabízí mnohá rozšíření a vylepšení, které je možné udělat. Jmenujme pár z nich:

- vložit senzor s více kanály pro další plyny

- prodloužit optickou cestu například soustavou zrcadel či použitím polopropustných zrcadel

- Mbed platformu nahradit pouze mikrokontrolerem LPC1768 a LCD modul nahradit levnějším displejem

- možnost ukládání dat na SD paměťovou kartu

- zabudovat obvod pro správné nabíjení baterií
- zabudovat obvod reálného času (názvy souborů by odpovídaly datu ukládání)

- programově přidat režim pro úsporu energie (vypnutí LCD; ukládání dat po delších časových intervalech; možnost výběru, zda snímat i teplotu a vlhkost)

- optimalizace programu
- ventilátor nahradit mikropumpou

 všechny klasické součástky vyměnit za SMD (vhodnější pro sériovou výrobu, lepší elektrické vlastnosti, levnější a spolehlivější)

- umožnit uživateli nastavit frekvenci a střídu buzení zdroje, frekvenci spouštění ventilátoru, frekvenci snímání pyrodetektorem, množství naměřených vzorků A/D převodníkem a tak dále ...

5 Závěr

V první části této práce jsem teoreticky popsal princip IR analýzy plynů. Zmínil jsem se o všech částech měřícího řetězce a možnostech jejich řešení. Nejvíce jsem se zaměřil na NDIR analýzu a pyroelektrické detektory.

Poté jsem provedl charakterizaci pyroelektrického detektoru s Fabry-Perotovým filtrem. Díky laditelnosti filtru nebylo třeba při změně měřené látky upravovat měřicí aparaturu. Senzor je velmi selektivní. Při měření dvou různých látek s alespoň jedním rozdílným vrcholem absorpce je možné je na základě výstupních dat identifikovat. Díky jemnému kroku ladění filtru (10 nm), jsem získal velmi detailní grafy, které svým průběhem odpovídají očekávání. (viz přílohu). Získání jednoho celého spektra při výchozím integračním čase trvalo přibližně 30 sekund. Při rychlé změně koncentrace se může stát, že začátek a konec jednoho cyklu měření spektra jsou pro různé koncentrace. Tento nedostatek lze odstranit zvětšením kroku snímání. Také to lze řešit zmenšením integračního času, což má za následek snížení SNR. IR zdroj i detektor musí být tepelně izolovány od svého okolí. Při měření se stávalo, že se změna teploty zářiče, například při otevření dveří, měření dočasně ovlivnila.

Praktické použití tohoto senzoru by mohlo být například monitorování pracovního prostředí. Nejvyšší povolené hodnoty těchto plynů jsou v řádech stovek ppm a méně. Aby byl senzor schopen detekovat tak nízké koncentrace, je třeba zvýšit jeho citlivost. Možné jsou dva způsoby: přizpůsobit a prodloužit optickou cestu např. pomocí zrcadel, nebo zvýšit vyzařovací výkon IR zdroje. První možnost je náročná mechanicky, druhá energeticky.

V poslední části jsem navrhl přenosný přístroj pro měření koncentrace oxidu uhličitého pomocí NDIR analýzy. Mojí snahou bylo vytvořit spolehlivý, levný a kompaktní měřák s pyroelektrickým detektorem. Žádná firma v ČR takový nevyrábí.

Zařízení obsahuje všechny komponenty potřebné k úspěšné infračervené analýze plynů. Jednotlivé části jsou řízené mikrokontrolerem. Měřák umí detekovat CO₂ s citlivostí nejméně 500 ppm. Je napájen buď z 5 V adaptéru, nebo ze čtyř 1,2 V baterií, které udrží přístroj v chodu přibližně po dobu 9 hodin měření. Přístroj každou sekundu snímá hodnotu koncentrace CO₂, teploty a vlhkosti vzduchu a zobrazuje je na LCD. Tyto údaje ukládá do textového souboru (cca 5 hodin záznamu), který je možné přes USB exportovat do PC a hodnoty dále zpracovávat.

Přístroj je prototyp, a proto se nabízí nesčetné množství úprav a vylepšení. Největším krokem vpřed by byla možnost měření koncentrace více plynů zároveň. Dalšími vylepšeními jsou například: zvýšení citlivosti pomocí prodloužení optické cesty, vhodnější volba mikrokontroleru (nynější je zbytečně výkonný) či optimalizace řídícího programu.

6 Použitá literatura

[1] JÁNSKÝ, Adam. Senzory pro monitorování životního prostředí. Praha, 2007, 102 s. Diplomová práce ČVUT

[2] VÁŇA, Jaroslav. Analyzátory plynů a kapalin. 2. doplněné vydání. Praha: SNTL. 1984, 520 s.

[3] GM ELECTRONIC. [online]. [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: http://www.gme.cz

[4] OSRAM. *SFH* 409 [online]. 2011 [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: http://www.gme.cz/img/cache/doc/511/400/sfh409-2-datasheet-1.pdf

[5] LED MICROSENSORS NT. *www.lmsnt.com* [online]. [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: http://lmsnt.com/leds1600-5000/models/1600-2400-nm-LEDs

[6] TOHRLABS. [online]. [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: http://www.thorlabs.de

[7] INFRATEC, *Window filters* [online]. [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: http://www.infratec-infrared.com/PDF/windows_filters.pdf

[8] INFRATEC, Application Advanced Features[online]. [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: http://www.infratec.cn/fileadmin/media/Sensorik/pdf/Appl_Notes/Application_Advanced_Features.pdf
[9] PERKIN ELMER. Infrared detectors and sensors [online]. 2009 [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: http://www.perkinelmer.com/cmsresources/images/44-4345cat_sensorsandemittersinfraredsensing.pdf

[10] KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, Infrared detectors and emitters: Materials and devices, 2001, 478 s.

[11] MURALT, Paul. Micromachined infrared detectors based on pyroelectric thin films. 2001, 51 s.

[12] CHEN, David: Pyroelectric Lithium Tantalate Thin Film Infrared Microsensors, 2010, 118 s.

[13] HAMAMATSU. *Characteristics and use of infrared detectors* [online]. 2011 [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/infrared_techinfo_e.pdf

[14] Golay cell. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Golay cell

[15] HAWKEYE TECHNOLOGIES. [online]. [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: http://hawkeyetechnologies.com/source-selection/ir2x/

[16] KENWORTHY. Detection of light - Lection 10: Bolometer s[online] [cit. 2014-04-29]. Dostupné z:

http://home.strw.leidenuniv.nl/~kenworthy/teaching/dol2011/10_DOL_Bolometers.pdf

[17] Stefan-Boltzmann Law. [online]. [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: http://wanda.fiu.edu/teaching/courses/Modern_lab_manual/stefan_boltzmann.html

[18] SMOLKOVÁ, Eva. Analýza látek v plynném stavu. 1. vyd. Praha: SNTL, 1991, 478 s.

[19] LAPOSA, Alexandr. ČVUT. Senzory plynů a par: Literární rešerše projektu MONS. 2013, 143 s.

[20] ANNAND, Balasubramaniyam. High detectivity infrared sensor. 2010, 74 s.

[21] NEUMANN, Norbert. Comparison of pyroeletric and thermopile detectors, 2013, 5 s.

[22] WHATMORE, Roger: Pyroeletric materials and devices, 2000

Bakalářská práce 2014

[23] UNIVERSITY OF CAMBRIDGE. *Application of a Pyroelectric-Infrared detection* [online]. [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/pyroelectricity/infrared.php

[24] ELECTRO OPTICAL COMPONENTS. *Pyroelectric Sensor / Detector* [online]. [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: http://www.eoc-inc.com/pyroelectric_detectors.htm

[25] THOMASNET. *Pyroelectric Detectors produce low noise* [online]. [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: http://news.thomasnet.com/fullstory/Pyroelectric-Detectors-produce-low-noise-454081

[26] AUTOMATIZACE.HW. [online]. [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: www.automatizace.hw.cz/

[27] ROITHNEE. *MID-IR LEDS* [online]. [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: http://www.roithner-laser.com/led_midir.html

[28] JANÁČ, Jiří. *Infračervená provozní analýza plynů*. Běchovice u Prahy: Ústav pro výzkum a využití paliv, 1971, 147 s.

[29] EDMUND OPTICS. *Optical filters* [online]. [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: http://www.edmundoptics.com/technical-resources-center/optics/optical-filters/

[30] TOUPIN, Laurine. *Non-dispersive infrared sensor attenuates gasoline pollution*. In: [online]. 2000 [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: http://www.pollutiononline.com/doc/non-dispersive-infrared-sensor-attenuates-gas-0001

[31] KANIA, Patrik. *INFRAČERVENÁ SPEKTROMETRIE* [online]. [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: http://www.vscht.cz/anl/lach1/7_IC.pdf

[32] NEUMANN, Normbert. INFRATEC. *Tunable infrared detector with integrated micromachined Fabry-Perot filter* [online]. 2007 [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: http://www.infratec.de/fileadmin/media/Sensorik/pdf/Appl_Notes/Tunable_Detector.pdf

[33] INFRATEC. *Aplication advanced features* [online]. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: http://www.infratec.cn/fileadmin/media/Sensorik/pdf/Appl_Notes/Application_Advanced_Features.pdf

[34] Mbed LPC1768 [online]. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: https://mbed.org/platforms/mbed-LPC1768/

[35] TME ELECTRONIC COMPONENTS. *LHI814G2/G20* [online]. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: http://www.tme.eu/cz/details/lhi814g2_g20/snimace-plynu/perkin-elmer/#

[36] TOHRLABS. [online]. [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: http://www.thorlabs.de

[37] SENSIRION. *Datasheet SHT1x* [online]. 2011 [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: http://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/Humidity/Sensirion_H umidity_SHT1x_Datasheet_V5.pdf

[38] OLIMEX. [online]. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: https://www.olimex.com/Products/Modules/LCD/MOD-LCD6610/open-source-hardware

[39] CONRAD ELECTRONIC. [online]. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: http://www.conrad.com/ce/en/product/454439/Hammond-Electronics-1553TGYBAT-Handheld-Device-Enclosure-Grey-210-x-100-x-32-mm

[40] INFRATEC. *Detector Basics* [online]. [cit. 2014-05-09]. Dostupné z: http://www.infratec-infrared.com/PDF/7_1detector%20basics_asc.pdf

[41] JANÁČ, Jiří. *Infračervená provozní analýza plynů*. Běchovice u Prahy: Ústav pro výzkum a využití paliv, 1971, 147 s.

[42] HINDAWI PUBLISHING CORPORATION. Infrared Absorption Spectra of Monohydric Alcohols, 2013

[43] BRISTOL UNIVERSITY. [online]. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: http://www.chm.bris.ac.uk/webprojects1997/RogerEC/cyclohexane.htm

[44] MCMASTER UNIVERSITY. [online]. 1997 [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: http://www.chemistry.mcmaster.ca/~chem206/problems/96ans9.html

[45] OLIMEX. *Mod - Nokia 6610* [online]. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: https://www.olimex.com/Products/Modules/LCD/MOD-LCD6610/resources/MOD-NOKIA6610-REV-A-sch.gif

7 Přílohy

	Průtok látky	Průtok N₂	Koncentrace
Látka	ml/min	ml/min	ppm
Isopropanol	10	90	6 285
	20	80	12 491
Toluen	10	90	3 873
	20	80	7 716
Methanol	10	90	19 647
	20	80	38 537
Benzen	10	90	14 113
	20	80	27 834
Aceton	10	90	41 562
	20	80	79 808
Cyklohexen	10	90	14 525
	20	80	28 634

7.1 Průtoky při měření s pyrodetektorem s F-P filtrem

	Průtok látky	Průtok N₂	Koncentrace
Látka	ml/min	ml/min	ppm
Isopropanol	10	116	5 000
		53	10 000
Toluen		67	5 000
		28	10 000
Methanol		389	5 000
		188	10 000
Benzen		275	5 000
		132	10 000
Aceton		853	5 000
		419	10000
Cyklohexen		283	5000
		136	10000

Tab. 8. Průtoky a koncentrace pro měření s konstantním průtokem

 Tab. 9.
 Průtoky a koncentrace pro měření s konstantní koncentrací

	Průtok látky	Průtok N ₂	Koncentrace
Látka	ml/min	ml/min	ppm
Isopropanol	10	53	
Toluen		28	
Methanol		188	10.000
Benzen		132	10 000
Aceton		419	
Cyklohexen		136	

Tab. 10. Průtoky a koncentrace pro měření s konstantní koncentrací s dlouhoukyvetou



7.2 Absorpční spektra měřených látek

Obr. 70. Absorpční spektrum Acetonu [41]









Obr. 73. Absorpční spektrum Cyklohexanu [43]



Obr. 74. Absorpční spektrum Metyl alkoholu [42]

7.3 Schéma zapojení



Obr. 75. Schéma zapojení IR analyzátoru


Obr. 76. Schéma zapojení LCD Nokia 6610 [45]

7.4	Seznam	součástek	a	přibližná	kalkulace
-----	--------	-----------	---	-----------	-----------

		Cena v korunách při nákupu více jak:				
Součástka	Kusů	1 kusu	100 kusů	1000 kusů		
Mbed	1	1452.87	1273.20	1273.20		
LHI 814	1	1560.05	1494.78	1494.78		
MIRL17-900	1	1000.00	900.00	850.00		
SHT15	1	860.50	533.85	503.22		
1553TGYBAT	1	392.65	335.62	315.88		
Ventilátor	1	382.06	236.12	236.12		
DPS	1	575.00	178.19	140.40		
LCD vývoj. deska	1	713.11	641.93	570.48		
Optická cesta	1	*	*	*		
Bat. 1.2V/2.6Ah	4	313.32	248.56	248.56		
Tlačítko Zap/Vyp	1	9.97	8.47	7.98		
Tlačítko	3	150.00	94.50	94.50		
Dutinková lišta	2	14.92	11.20	9.70		
OZ LT1013CP	1	36.14	27.88	23.51		
Tran. BSS123	2	7.16	5.10	2.20		
ZD 1N4736A	2	1.24	1.24	0.89		
R 27r	1	1.00	1.00	0.65		
R 1k	3	2.89	2.89	1.86		
R 4k7	2	2.76	2.34	2.00		
R 10k	3	2.99	2.99	1.96		
R 33k	3	3.09	3.09	1.96		
R 91k	2	2.99	2.99	1.31		
R 4M7	2	0.89	0.62	0.34		
C 1n	2	3.64	2.90	2.48		
C 3n3	2	5.09	3.26	2.48		
C 1u	2	14.74	9.78	6.60		
C 10u	1	4.82	3.27	2.55		
C 33u	3	24.54	20.85	17.19		
Ostatní (kabely)	1	100.00	90.00	80.00		
Celkem	-	7638.43	6136.62	5892.80		

 Tab. 11.
 Seznam součástek a jejich cena (* - bylo vyrobeno na ČVUT)

7.5 Plošné spoje



Obr. 77. Vrchní (nahoře) a spodní strana (dole) DPS pro řídící elektroniku



Obr. 78. DPS pro senzor LHI814



Obr. 79. DPS pro IR zdroj MIRL17-900



Obr. 80. DPS pro senzor teplotní a vlhkostní senzor SHT15

7.6 Přiložené CD

Přiložený kompaktní disk obsahuje

- Elektronická podoba tohoto dokumentu
- Fotografie přístroje (složka Fotografie)
- Návrhy plošných spojů pro program Allegro PCB Editor v16.6 (složka Allegro)

- 3D modely optické cesty pro program SolidWorks 2013 a jejich výkresy (složka SolidWorks)

- 3D model přenosného senzoru oxidu uhličitého pro program VariCAD (složka VariCAD)

- Obrázky měřicí aparatury pro charakterizaci senzoru s Fabry-Perotovým filtrem (složka Měřicí aparatura)