

Senzory pro snímání dávek infračerveného záření

Sensors for the infrared dosimetry

Peter Kebísek

Bakalářská práce
2008



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
Ústav automatizace a řídicí techniky
akademický rok: 2007/2008

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Peter KEBÍSEK**
Studijní program: **B 3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Automatické řízení a informatika**

Téma práce: **Senzory pro snímání dávek infračerveného záření**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou měření dávek infračerveného záření produkovaného přírodními a umělými zdroji.
2. Projděte firemní a akademické internetové zdroje zaměřené na problematiku měření dávek infračerveného záření.
3. Shromážděte aktuální informace o senzorech infračerveného záření s důrazem na technické specifikace, aplikační příklady, tuzemské či zahraniční dodavatele a cenové relace.
4. Navrhněte vhodné typy infračervených senzorů pro objednání vzorků.
5. Provedte praktické měření v případě realizace dodávky vzorků senzorů v termínu řešení diplomové práce.

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. Levitin, I.B.: **Infračervená technika**. Energia, Leningrad 1973
2. Vaško, A.: **Infračervené záření a jeho užití**. SNTL, Praha 1963
3. Daňo, S., Kreidl, M.: **Senzory a měřicí obvody**. ČVUT, Praha 1996
4. Krčmář, A., Kepert, J.: **Zdroje světelného záření**, UTB ve Zlíně, FT ve Zlíně 2000
5. Daňek, D.: **Kalibrační pracoviště pro infračervený dozimetr**. Diplomová práce UTB ve Zlíně, FT ve Zlíně 2001
6. Neumann, P.: **Měření expozičního množství telepného záření**. Disertační práce UTB ve Zlíně, FT ve Zlíně 2001
7. <http://www.aecosensors.com>
8. <http://www.micro-epsilon.cz>

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Petr Neumann, Ph.D.

Ústav elektrotechniky a měření

Datum zadání bakalářské práce:

22. února 2008

Termín odevzdání bakalářské práce:

6. června 2008

Ve Zlíně dne 22. února 2008

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

V mojej práci som sa snažil oboznámiť čitateľov s problematikou merania infračerveného žiarenia. Senzory, pomocou ktorých sa meria, som zoradil do skupín a popísal ich technické špecifikácie. Následne som navrhol vhodný typ infračerveného senzoru pre objednanie vzorkov, pomocou ktorého som spravil skúšobné merania.

Kľúčové slová:

Infračervené žiarenie, senzor, fotodióda, priepustný filter infračerveného žiarenia

ABSTRACT

The aim of my Bachelor thesis is to introduce the infrared radiation measurement to the reader. I have grouped the suitable sensors and described their specifications. I have proposed the serviceable infrared sensor to be ordered in the sample quantity for the test measurement and experiments.

Keywords:

Infrared radiation, sensor, photodiode, passband filter for infrared radiation.

Touto cestou chcem vyjadriť poďakovanie vedúcemu bakalárskej práce Ing. Petru Neumannovi, Ph.D. za metodické usmernenie, informácie a čas, ktorý mi venoval pri vypracovaní mojej bakalárskej práce.

Prohlašuji, že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků, je-li to uvolněno na základě licenční smlouvy, budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně

.....
Podpis diplomanta

OBSAH

I	ÚVOD	7
1	TEORETICKÁ ČASŤ	9
1.1	ELEKTROMAGNETICKÉ ŽIARENIE	9
1.2	CHARAKTERISTIKA INFRAČERVENÉHO ŽIARENIA	10
1.3	ENERGETICKÉ CHARAKTERISTIKY INFRAČERVENÉHO ŽIARENIA	11
1.3.1	Odrazivosť, absorpcia, priepustnosť	12
1.3.2	Absolútne čierne teleso	14
1.4	ŠÍRENIE INFRAČERVENÉHO ŽIARENIA	15
1.4.1	Oslabené žiarenie v reálnom prostredí	15
1.4.2	Šírenie infračerveného žiarenia v atmosfére	16
1.5	ZDROJE INFRAČERVENÉHO ŽIARENIA	18
1.5.1	Rozdelenie zdrojov infračerveného žiarenia	18
1.5.2	Prírodné zdroje infračerveného žiarenia	18
1.5.3	Umelé zdroje infračerveného žiarenia	20
1.6	SENZORY A ICH KATEGÓRIE	23
1.7	SENZORY INFRAČERVENÉHO ŽIARENIA	23
1.7.1	Tepelné senzory infračerveného žiarenia	24
1.7.2	Kvantové senzory infračerveného žiarenia	28
2	PRAKTICKÁ ČASŤ	32
2.1	PRINCÍP MERACEJ METÓDY	32
2.2	VYBRANÝ SENZOR A JEHO POPIS	33
2.2.1	Fotodióda SLD-69C1A	35
2.2.2	Fotodióda SLD-69IR1A	38
2.3	ELEKTRICKÉ ZAPOJENIE SENZORU	41
2.4	MERANIE	42
2.4.1	Meranie s prírodným zdrojom žiarenia – Slnko	43
2.4.2	Meranie s umelým zdrojom žiarenia – volfrámová žiarovka	45
3	ZHRNUTIE ZÍSKANÝCH POZNATKOV	54
II	ZÁVER	56
III	RESULT	57
IV	ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	58
V	ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK	59
VI	ZOZNAM OBRÁZKOV	61
VII	ZOZNAM TABULIEK	63

ÚVOD

Úlohou práce je priblížiť čitateľom problematiku merania dávok infračerveného žiarenia produkované prírodnými a umelými zdrojmi. Ďalej prejsť aktuálne informácie o senzoroch, ktoré tieto dávky dokážu snímať s dôrazom na ich technické špecifikácie.

Delené sú na tepelné a kvantové. Pri objednaní vzorkov pre praktické meranie som dal prednosť kvantovým senzorum, ktoré využívajú fyzikálne javy vznikajúce pri priamej interakcii dopadajúcich fotónov na ne. Vybral som si dve fotodiódy, a to SLD-69C1A a SLD-69IR1A od firmy Silonex, pretože spĺňajú moje požiadavky, čo znamená že sú schopné veľmi citlivo prijímať infračervené žiarenie jeho blízkej oblasti. Fotodióda SLD-69C1A je citlivá na vlnové dĺžky od 400nm do 1100nm, teda je citlivá aj na viditeľné žiarenie na rozdiel od fotodiódy SLD-69IR1A, ktorá obsahuje filter. Tento filter prepúšťa iba infračervené žiarenie v rozsahu vlnových dĺžok 700 až 1100 nm. Pomocou oboch fotodiód som zachytával dávky infračerveného žiarenia produkované prírodným a umelým zdrojom za rôznych podmienok.

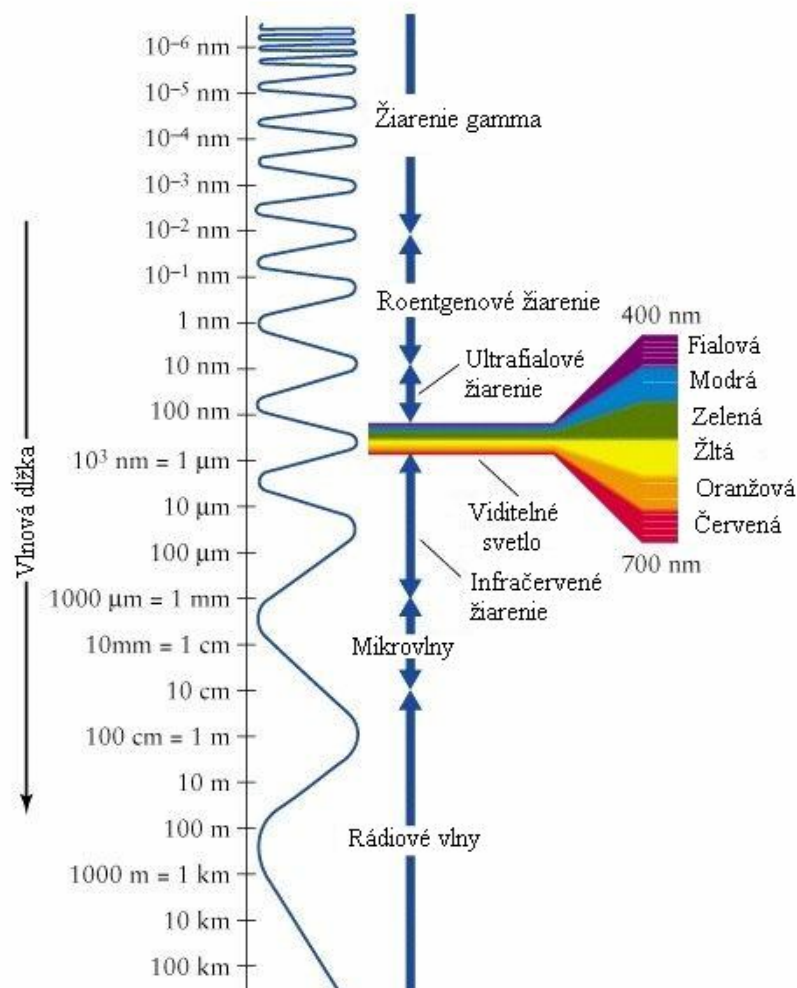
Z prírodného som si vybral Slnko, pretože predstavuje najvýdatnejší zdroj žiarenia a z umelého volfrámovú žiarovku, kvôli jej ľahkej dostupnosti a použiteľnosti. Výstupné napätia oboch fotodiód som porovnal a zanalyzoval.

I. TEORETICKÁ ČASŤ

1 TEORETICKÁ ČASŤ

1.1 Elektromagnetické žiarenie

Svetlo je časť celej škály elektromagnetických vln šíriacich sa kozmickým priestorom a na zemskom povrchu. Tieto vlny pochádzajú jak z prirodzených zdrojov (Slnko a ďalšie vyžarujúce vesmírne objekty), tak zo zdrojov umelých (komunikačné a zdieľacie zdroje apod.). Spektrum elektromagnetických vln pokrýva veľmi široké pásmo od rádiových s vlnovou dĺžkou rádovo desiatky až stovky metrov až po lúče „X“ s vlnovou dĺžkou až bilióntina metra. Optické žiarenie leží medzi týmito oblasťami a vykazuje jedinečnú zmes fyzikálnych vlastností typických pre vlnové a kvantové chovanie. Na nasledujúcom obrázku je názorné rozdelenie spektrálnych oblastí elektromagnetického žiarenie podľa vlnovej dĺžky i kmitočtu s dôrazom na oblasti všeobecne známe do účinku a aplikácií [5].



Obr.1 Spektrum elektromagnetického žiarenia[9]

1.2 Charakteristika infračerveného žiarenia

Infračervené žiarenie objavil v roku 1800 W. Herschel pri skúmaní tepelného účinku v jednotlivých oblastiach slnečného spektra. Postupom času sa zistilo, že najvyšší tepelný účinok sa dosahuje za červeným koncom viditeľného spektra v neviditeľnej oblasti, ktorá dostala názov infračervená .

Infračervené žiarenie je elektromagnetické vlnenie, ktoré ma rovnakú fyzikálnu povahu ako žiarenie viditeľné. Obe tieto žiarenia sú tvorené priečnymi elektromagnetickými vlnami a šíria sa v smere žiarenia v homogénnych prostrediach (vákuum, plyny, kvapaliny, pevné látky) približne priamočiario.

Rovnako ako viditeľné žiarenie má infračervené žiarenie okrem vlnových vlastností tiež časticové vlastnosti žiarenia. Toto si predstavujeme ako prúd jednotlivých častí – fotónov. Fotón elektromagnetického žiarenia s kmitočtom f má energiu $h \cdot f$, kde h je Planckova konštanta ($h = 6,624 \cdot 10^{-34} \text{ W} \cdot \text{s}^2$).

Čím je kmitočet vyšší, tým väčšiu má fotón energiu. Energiu fotónu je možné vyjadrovať tiež pomocou kmitočtu, pretože medzi kmitočtom f , vlnovou dĺžkou optického žiarenia λ a rýchlosťou optického žiarenia c platí vzťah:

$$f = c \cdot \lambda^{-1} \quad [m \cdot s^{-1}; m^{-1}; Hz] \quad (1.1)$$

$$\text{kde } c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Infračerveným žiarením rozumieme žiarenie väčších vlnových dĺžok, pokračujúcich od temno červeného okraja viditeľného spektra, tj. od vlnové dĺžky 750 nm až po 10^6 nm. Podľa medzinárodného odporúčania CIE sa v tomto spektrálnom rozsahu delí infračervené žiarenie na tri druhy:

IR – A 780nm – 1400nm

IR – B 1400nm – 3000nm

IR – C 3000nm – 1mm

Pozn.: Skratka IR je z anglického infra-red.

1.3 Energetické charakteristiky infračerveného žiarenia

Na meranie infračerveného žiarenia sa používa súbor energetických veličín a jednotiek.

Základnou žiarivou veličinou je **množstvo žiarenia Q [J]**, ktorá predstavuje množstvo energie prenášané žiarením.

Žiarivý tok Φ_e predstavuje energiu prenesenú žiarením za jednotku času.

$$\phi_e = \frac{dQ_e}{dt} \quad [J \cdot s^{-1}] \quad (1.2)$$

Intenzita žiarenia J_e alebo tiež plošná hustota žiarivého toku: Pokiaľ prechádza malou plochou dS žiarivý tok $d\Phi_e$ v smere kolmom k tejto ploche, potom intenzitu žiarenia definujeme výrazom:

$$J_e = \frac{d\Phi_e}{dS} \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (1.3)$$

Intenzita vyžarovania H_e : Intenzita vyžarovania H_e malej plochy dS je daná pomerom žiarivého toku $d\Phi_e$, vysielaného touto plochou do celého polpriestoru, veľkosťou tejto plochy, teda vzťahom:

$$H_e = \frac{d\Phi_e}{dS} \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (1.4)$$

Ožiarenie, nazývané tiež intenzita ožiarenia E_e : Pokiaľ dopadá na malú plochu dS žiarivý tok $d\Phi_e$, potom je jej ožiarenie E_e dané vzťahom:

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dS} \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (1.5)$$

Žiarivosť I_e : Pokiaľ vysiela bodový zdroj žiarenia Z do malého priestorového uhla $d\omega$ žiarivý tok $d\Phi_e$, tak jeho žiarivosť v smere danom osou priestorového uhlu je daná výrazom:

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\omega} \quad [W \cdot \text{sterad}^{-1}]$$

(1.6)

Všeobecne je žiarivosť zdroja v rôznych smeroch priestoru rôzna.

Žiara alebo tiež merná žiarivosť L_e : Uvažujme zdroj žiarenia konečných rozmerov a vytknime na jeho povrch malú plochu dS . Žiara zdroju v mieste plochy a v danom smere je definovaná podielom žiarivosti podľa plochy dS v tomto smere a priemetom tejto plochy do roviny kolmej k tomuto smeru (zdanlivá veľkosť žiariacej plochy). Žiara je teda daná vzťahom:

$$L_e = \frac{dI_e}{dS \cdot \cos \alpha} = \frac{d^2\Phi_e}{d\omega \cdot dS \cdot \cos \alpha} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot \text{sterad}^{-1}] \quad (1.7)$$

Všetky doposiaľ uvedené veličiny boli odvodené so žiarivého toku a vyjadrovali jeho rozloženie a parametre geometrické (plochy a priestorové uhly). Za žiarivý tok sme teda považovali žiarivý tok všetkých vlnových dĺžok, ktoré sú v jeho spektre obsiahnuté [1],[4],[5],[7].

1.3.1 Odrazivosť, absorpcia, priepustnosť

Pokiaľ dopadá žiarivý tok Φ na povrch telesa, môžeme ho rozdeliť do troch častí. Časť dopadajúceho toku ${}^1\Phi_a$ sa od telesa odráža, časť ${}^2\Phi_a$ teleso pohltí a časť ${}^3\Phi_a$ telesom prechádza. Platí rovnica:

$$\Phi_a = {}^1\Phi_a + {}^2\Phi_a + {}^3\Phi_a \quad (1.8)$$

Pre nepriehľadné telesá je zložka ${}^3\Phi_a$ nulová.

Optické vlastnosti svetla charakterizujeme nasledujúcimi vlastnosťami:

$$\text{Odrazivost' R:} \quad R = \frac{{}^1\Phi_a}{\Phi_a} \quad [-] \quad (1.9)$$

$$\text{Absorpcia A:} \quad A = \frac{{}^2\Phi_a}{\Phi_a} \quad [-] \quad (1.10)$$

$$\text{Priepustnost' T:} \quad T = \frac{{}^3\Phi_a}{\Phi_a} \quad [-] \quad (1.11)$$

Tieto udávajú, aká časť žiarivého toku dopadajúca na teleso sa odrazí, pohltí alebo teleso prepustí. Platí medzi nimi vzťah:

$$R + A + T = 1 \quad (1.12)$$

Rovnakým spôsobom zavádzame i veličiny spektrálne, ale s odlišným označením:

$$\text{Pomerná spektrálna odrazivost' } R_\lambda : \quad R_\lambda = \frac{{}^1\Phi_a}{\Phi_a} \quad [-] \quad (1.13)$$

$$\text{Pomerná spektrálna pohltivost' } A_\lambda : \quad A_\lambda = \frac{{}^2\Phi_a}{\Phi_a} \quad [-] \quad (1.14)$$

$$\text{Pomerná spektrálna priepustnost' } T_\lambda : \quad T_\lambda = \frac{{}^3\Phi_a}{\Phi_a} \quad [-] \quad (1.15)$$

Pre spektrálne veličiny patrí rovnica:

$$R_\lambda + A_\lambda + T_\lambda = 1 \quad (1.16)$$

Všetky uvedené veličiny sú závislé všeobecne na vlnovej dĺžke žiarenia, na látke a geometrii telesa, na jeho teplote a stavu povrchu. Často sa vyjadrujú v percentách.

Pre názornosť tu uvádzam príklady troch skupín látok, ktoré sú charakterizované veľkou pomernou odrazivosťou, pomernou pohltivosťou a pomernou priepustnosťou.

Kovy v kompaktnej forme vykazujú veľkú odrazivosť žiarenia všetkých vlnových dĺžok, a to obzvlášť v infračervenej oblasti. Tu je ich odrazivosť skoro 100%. Napríklad odrazivosť čerstvo pripraveného strieborného zrkadielka je v infračervenej oblasti 98%. Z toho vyplýva, že pomerná pohltivosť kovov je veľmi mala. Oproti tomu černe sú charakterizované veľkou pohltivosťou a u najkvalitnejších černí až 99%. Poslednou

skupinou látok sú optické materiály, charakteristické svojou veľkou priepustnosťou vo vlnovom obore, kde sú používané. Ako príklad uveďme číre optické sklá, ktoré ukazujú vo viditeľnej a infračervenej oblasti do vlnovej dĺžky $2,5 \mu m$ priepustnosť viac než 90% a veľmi malú pohltivosť[2],[4].

1.3.2 Absolútne čierne teleso

Pokiaľ pozorujeme rôzne osvetlenia telesa, ktoré samy svetlo nevydávajú, potom telesá, ktorých povrch odráža menej svetla, sa nám zdá zdajú tmavšie. Dokážeme však realizovať telesá, ktoré odrážajú len minimálny zlomok svetla naňho dopadajúceho a zdá sa preto ešte černejší ako najlepšie čierne. Svetelný lúč vstupujúci do dutiny musí vykonať veľký počet odrazov n na stenách dutiny, než náhodne vystúpi z dutiny von. Pokiaľ je odrazivosť stien malá, potom odrazivosť R vstupného otvoru bude zanedbateľne malá. Takto realizované teleso nazývame preto telesom absolútne čiernym.

Pokiaľ udržujeme absolútne čierne teleso na teplote T , potom z jeho otvoru vystupuje presne definované teplotné žiarenie.

Kirchhoffove zákony nadobúdajú pre absolútne čierne teleso obzvlášť jednoduchých tvarov, a to:

$$H_0 = f(T) \quad (1.17)$$

alebo

$$H_\lambda = f(T, f) \quad (1.18)$$

v nich H_0 označuje intenzitu vyžarovania absolútne čierneho telesa a $H_{0\lambda}$ jeho monochromatické vyžarovanie [2].

1.4 Šírenie infračerveného žiarenia

1.4.1 Oslabené žiarenie v reálnom prostredí

Pri priechode žiarenia reálnym prostredím (optickými materiálmi, rôznymi vrstvami atmosféry atď.) dochádza k oslabeniu svetelného toku.

Príčinou je pohlcovanie žiarenia spojené s premenou na iné druhy energie, hlavne na tepelnú a rozptyl žiarenia, pri ňom sa tepelná energia po priechode reálnym prostredím odchyľuje v rôznych uhloch od pôvodného smeru.

Akékoľvek reálne prostredie alebo látky rozptyľujú žiarenie v dôsledku svojej rôznorodosti. Konkrétne v atmosfére túto rôznorodosť vytvára vodná para, častice pevných látok apod. Potom môžeme akékoľvek prostredie považovať za disperzný systém, ktorý sa skladá z niekoľkých fáz s rôznym indexom lomu. Najjednoduchší disperzný systém sa skladá z dvoch fáz – vonkajšia a vnútorná. Charakter systému sa určuje stupňom disperznosti vnútornej fázy a fyzikálnymi povahami oboch fáz. Jednoducho môžeme disperzné systémy roztriediť do troch skupín:

1. *Molekulovo – disperzné systémy* – stupeň disperznosti vnútornej fázy tu tvoria molekuly alebo ionty, častice majú rozmer rádovo 0,1 – 1 nm, príkladom týchto systémov sú roztoky.

2. *Vysoko – disperzné (kaloidné) systémy* – stupeň disperznosti vnútornej fázy je charakterizovaný časticami, ktoré obsahujú tisíce molekúl a rozmery týchto častíc sa pohybujú rádovo v rozmedzí 1 – 100 nm.

3. *Hrubo – disperzné systémy* – vnútornú fázou tvoria veľké častice. Tieto systémy sa delia na suspenzie, u nich je vnútorná fáza pevná a vonkajšia buď kvapalná alebo plynná a emulzie, kde je vnútorná fáza kvapalná. Príkladom týchto systémov je napríklad atmosférický zákal (aerosuspenzia) alebo hmla (emulzia drobných vodných kvapiek vo vzduchu).

Všeobecný zákon oslabenia žiarenia v prostredí je daný exponenciálnym zákonom podľa Bouguera:

$$\Phi = \Phi_0 \cdot e^{-kx} \quad (1.19)$$

Kde Φ je žiarivý tok prechádzajúci vrstvou prostredia, Φ_0 žiarivý tok dopadajúci na vrstvu prostredia a k súčiniteľ oslabenia, ktorý zohľadňuje obe príčiny oslabnutia – pohltenie a rozptyl.

Skúmanie oslabeného infračerveného žiarenia pri priechode reálnym prostredím ma veľký význam pre infračervenú techniku. Umožňuje odhadovať dosah infračervených prístrojov a navrhovať ich optické časti.

Pre rozptyl žiarenia v prostredí, ktoré obsahuje častice rádovo menšie, než je vlnová dĺžka žiarenia, sa dá vyjadriť súčiniteľ rozptylu podľa Rayleigha:

$$k_r = \frac{32\pi^3(n-1)^2}{3N\lambda^4} = \frac{a}{\lambda^4} \quad (1.20)$$

Kde n je index lomu častice, N počet častíc v 1 cm^3 a λ vlnová dĺžka svetla. Je zrejmé, že vo veľmi čistej atmosfére je infračervené žiarenie, ktorého dĺžka je oveľa viac väčšia než viditeľného žiarenia, rozptýlené oveľa menej, ako viditeľné a ultrafialové žiarenie. Táto závislosť ale neplatí pri priechode žiarenia hustou hmlou, v ktorej je infračervené žiarenie oslabované rovnako ako žiarenie viditeľné. Je treba ešte dodať, že voda vykazuje veľkú pohltivosť infračerveného žiarenia. Priechod infračerveného žiarenia tenkou vrstvou vody (do 1 mm) je veľmi malý a pri šírke vrstvy 1cm sa voda stáva pre infračervené žiarenie dokonale nepriepustná [1].

1.4.2 Šírenie infračerveného žiarenia v atmosfére

Šírenie infračerveného žiarenia v atmosfére závisí na konkrétnych meteorologických podmienkach, hlavne na vlhkosti atmosféry, tj. množstvo vodných pár a kvapiek vody v atmosfére. Je teda rôzne za jasného počasia, daždi, hmle.

Šírenie infračerveného žiarenia atmosférou sa oslabuje v dôsledku troch rôznych fyzikálnych procesov:

1. je pohlcované molekulami plynu, ktoré tvoria vzduchový stĺpec atmosféry
2. je rozptýlené časticami vzdušného oparu a časticami tvoriace hmlu a oblaky
3. je rozptýlené molekulami atmosférických plynov

Stĺpec atmosféry je zložený so zmesi plynov, hlavne kyslíku a dusíku a v malom

množstve i so vzácnych plynov. Ďalšou dôležitou zložkou atmosféry je vodná para, obsiahnutá v rôznych množstvách. To závisí na teplote a tlaku (nadmorskej výške) vzduchu. Okrem týchto zložiek sú v atmosfére obsiahnuté častice pevného a kvapalného skupenstva – prach, dym, vodne kvapky. Vodné kvapky malých rozmerov vytvárajú vzdušný opar, väčšia potom hmlu a dážď. Niekedy atmosféra obsahuje tiež malé ľadové kryštály. Pomer rozmerov rozptyľujúcich častíc a vlnovej dĺžky prechádzajúceho žiarenia určuje charakter rozptylu.

Pokiaľ je atmosféra veľmi čistá (napr. vo vysokohorských podmienkach), obsahujúca iba molekuly plynu, je rozptyl nepriamo úmerný štvrtej mocnine vlnovej dĺžky prechádzajúceho žiarenia. V tomto prípade je rozptyl infračerveného žiarenia nepatrný, pretože rozmery rozptyľujúcich častíc ρ sú podstatne menšie, ako vlnová dĺžka λ . Zväčšovaním rozmeru častíc (napr. pri ľahkej hmle), keď $\rho = \lambda$, sa veľmi mení charakter rozptylu. Za podmienok oparu alebo ľahkej hmly je oslabenie infračerveného žiarenia v atmosfére oveľa menšie, ako je tomu u viditeľného žiarenia. Pri hustej hmle alebo daždi, keď majú vodné kvapky priemer 5 – 100 μm , je ale oslabenie viditeľného a infračerveného žiarenia skoro rovnaké, a to až do vlnovej dĺžky $\lambda = 15 \mu\text{m}$. Pre dlhovlnné infračervené žiarenie sa rozptyl v hmle znižuje, ale narastá tu pohltenie vodnými parami.

Stĺpec atmosféry je filtrom, ktorý oslabuje žiarenie veľmi nerovnomerne pre rôzne vlnové dĺžky. V spektre žiarenia, ktoré prechádza vrstvou atmosféry, je veľa absorpčných pásov, ktoré spôsobuje vodná para, kysličník uhličitý a ďalšie plyny obsiahnuté v atmosfére, napr. ozón, kysličník dusičnatý, metán atď. Najviac pohlcuje infračervené žiarenie vodná para, ktorej absorpčné pásy sa prekrývajú s početnými absorpčnými pásmi iných plynov, obsiahnutých v spodnej vrstve atmosféry. Absorpčné pásy vodnej pary odpovedajú úsekom spektra 1,2 – 1,5 ; 1,8 – 2,0 ; 2,5 – 3,0 ; 5,0 – 8,0 μm .

1.5 Zdroje infračerveného žiarenia

1.5.1 Rozdelenie zdrojov infračerveného žiarenia

Infračervená technika dnes používa najrôznejšie zdroje infračerveného žiarenia.

Väčšinou sú to zdroje tepelné, ktoré sú tvorené rôznymi telesami (pevnými, kvapalnými, plynnými), pokiaľ je ich teplota vyššia ako 0 K. Zdroje infračerveného žiarenia rozdelíme na umelé a prírodné [1].

1.5.2 Prírodné zdroje infračerveného žiarenia

Prírodné zdroje infračerveného žiarenia rozdelíme do troch základných skupín:

- a) pozemské zdroje žiarenia – pôda, rastlinstvo, voda, budovy, dopravné prostriedky, ľudia
- b) atmosférické zdroje žiarenia – vodné pary, plyny obsiahnuté v atmosfére, oblaky, polárne žiare
- c) kozmické zdroje žiarenia – Slnko, Mesiac, planéty, hviezdy, hmloviny

1.5.2.1 Pozemské zdroje žiarenia

K týmto zdrojom žiarenie patria objekty, ktoré sa nachádzajú na povrchu Zeme.

Spektrálne zloženie týchto tepelných žiaričov závisí na ich teplote, vyžarovanej schopnosti a odrazivosti. Žiarenia pozemských zdrojov je rovné súčtu vlastného tepelného žiarenia a odrazeného slnečného žiarenia. Odrazivosť pozemských zdrojov žiarenia udáva hodnota, nazývaná *albedo*. Vyjadruje pomer súčtu odrazených žiarivých tokov k dopadajúcemu.

Žiarenie vodného povrchu v infračervenej oblasti sa rovná takmer žiareniu čierneho telesa. Vo vrstve vody a hrúbke 0,1mm je dopadajúce slnečné žiarenie dokonale pohltené od vlnovej dĺžky $\lambda = 2 \mu\text{m}$ a pri hrúbke 10cm od vlnovej dĺžky $\lambda = 0,95 \mu\text{m}$.

Žiarenie rastlín je preskúmané iba nepatrne, pričom príčinou je zložité určovanie teploty ich povrchu. Rastliny majú totiž vlastné regulátory teploty, napr. v horkom dni sa trávnik zahrieva oveľa menej ako kameň. Predpokladá sa, že nerovný povrch rastlín vysiela žiarenie blízke spektrálnemu zloženiu žiarenia čierneho telesa.

1.5.2.2 Atmosférické zdroje žiarenia

Tieto zdroje žiarenia sú obsiahnuté v atmosfére a rozptyľujú žiarenie kozmických zdrojov a Zeme. Preto nazývame atmosférické zdroje žiarenia druhotnými zdrojmi infračerveného žiarenia. Vytvárajú teplotné pozadie a sú obvykle zdrojmi porúch.

Obzvlášť rušivo pôsobí žiarenie oblohy, v oblasti infračerveného žiarenia $\lambda > 3 \mu\text{m}$ je teplotné žiarenie atmosféry väčšie než žiarenie Slnka, rozptýlené v atmosfére, pritom teplotné žiarenie oblohy cez deň a v noci je približne rovnaké.

Spektrum žiarenia oblohy u nižších oblakov má charakter žiarenia čierneho telesa. V tomto prípade mraky, ktoré sa skladajú z množstva vodných pár, dokonale rozptyľuje žiarenie viacnásobnými odrazmi. Spodný povrch mrakov odráža rozptýlené žiarenie pozemných zdrojov, ktorých vyžarovanie sa takmer rovná žiareniu čierneho telesa.

Žiarenie u vysokých oblakov je tiež podobné žiareniu čierneho telesa, je ale závislé na teplote atmosféry vo výške, kde sa oblaky nachádzajú. Pretože je táto teplota nižšia než v malej výške, je tiež intenzita žiarenia menšia, než u oblakov nachádzajúcich sa nižšie.

1.5.2.3 Kozmické zdroje žiarenia

K týmto zdrojom patrí predovšetkým Slnko. K pozemskému pozorovateľovi sa javí pod uhlom $32'$. Žiara slnečného kotúča je najväčšia v strede a klesá smerom k okraju. Tento pokles je rôzny pre rôzne druhy žiarenia. V ultrafialovej oblasti, pri $\lambda = 32 \mu\text{m}$, má žiara na okrajoch slnečného kotúča hodnotu 60% žiare v bode, v infračervenej oblasti táto hodnota robí 80%.

Slnčné žiarenie je v infračervenej oblasti dokonale preskúmané do oblasti $12 \mu\text{m}$, pri väčších vlnových dĺžkach je toto žiarenie pohltené vrstvami atmosféry. Pre vlnovú dĺžku $\lambda = 21 \mu\text{m}$ existuje pásmo prestupu, ktoré prepustí 14% slnečného žiarenia.

Slnko predstavuje najvýdatnejší zdroj žiarenia, vytvárajúci na povrchu Zeme intenzitu žiarenia $1,4 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$.

Mesiac je druhým najvýdatnejším zdrojom kozmického žiarenia. Oproti pozorovateľovi na Zemi sa javí pod uhlom $31'$. Mesiac odráža na Zem slnečné žiarenie. Odrazivosť na povrchu Mesiaca sa udáva hodnotou *sférického albeda* A_0 . Je to pomer

žiarivého toku Φ_2 , ktorý sa rozptyľuje na povrchu pologule, k žiarivému toku Φ_2 , dopadajúcemu na povrch gule zo všetkých smerov:

$$A_0 = \frac{\Phi_1}{\Phi_2} \quad [-] \quad (1.21)$$

Stredná hodnota sférického albeda Mesiaca sa rovná 0,073 a pre jednotlivé plochy mesačného povrchu sa pohybuje v medziach 0,054 – 0,176.

Intenzita ožiarenie Zeme od Mesiaca je 645 000-krát nižšia ako od Slnka. Všetky planéty slnečnej sústavy, vrátane tých najbližších, ožarujú Zem oveľa menej než mesiac. Veľmi slabé je i žiarenie prenikajúce na zemský povrch z hviezd.

1.5.3 Umelé zdroje infračerveného žiarenia

1.5.3.1 Žiarovky s volfrámovým vláknom

Tieto žiarovky pracujú s teplotou vlákna od 2500 K do 3200 K. U vákuových žiaroviek je maximálna teplota vlákna 2500 K a vlákno vydáva žiarenie o vlnovej dĺžke $\lambda = 0,96 \mu\text{m}$.

Výhodou žiaroviek s volfrámovým vláknom je ich jednoduchá konštrukcia, stabilná hodnota vlnovej dĺžky vydávaného žiarenia, jednoduchá použiteľnosť a v neposlednom rade aj nízka cena.

1.5.3.2 Zdroje infračerveného žiarenia na ohrev

Jednou zo základných častí akéhokoľvek zariadenia určeného k ohrevu, sušeniu alebo o inému použitiu je zdroj infračerveného žiarenia. Tieto zariadenia sú väčšinou zložené z dvoch základných častí, a to zo zdroja žiarenia a z reflektoru, ktorého úlohou je meniť rozloženie žiarivého toku zdroja žiarenia.

Zdroje infračerveného žiarenia určené na ohrev sa delia na 3 základné skupiny:

- a) zdroje vysokoteplotné – zahrievané na teplotu $t \geq 1500^\circ\text{C}$, vlnová dĺžka vydávaného žiarenia sa pohybuje v rozmedzí $0,78 - 1,8 \mu\text{m}$, ktoré sú použité napr. v infražiarovkách a halogénových žiarovkách.

- b) zdroje strednoteplotné – zahrievané na $450^{\circ}\text{C} \leq t \leq 1500^{\circ}\text{C}$, $\lambda \geq 1,8\mu\text{m}$, ako príklad je možné uviesť keramické alebo kovové trubkové žiariče.
- c) zdroje nízkoteplotné – zahrievané na $t \leq 450^{\circ}\text{C}$, používané u infražiaričov s veľkou keramickou plochou.

1.5.3.3 Nízkotlakové césiové výbojky

Tieto výbojky sú veľmi účinným zdrojom monochromatického infračerveného žiarenia o vlnových dĺžkach 852,1nm a 894,4nm. Césiová výbojka je naplnená argónom, a to z dôvodu zníženia zápalného napätia. Tlak pár cesia vo vnútri výbojky je 2500 Pa, tlak argónu 31000 Pa. Kvôli tepelnej izolácii je výbojka uzavretá v ochranej banke s vysokým vákuom. Na elektródach je nanosená emisná látka, ktorá zľahčuje emisiu elektrónov.

Je treba poznamenať, že pary cesia napadajú niektoré druhy skla. Preto je životnosť týchto výbojok mala(asi 100 h) a využitie veľmi špecifické.

1.5.3.4 Xenónové výbojky

U týchto sa výboj tvorí v plyne – xenóne, ktorého tlak dosahuje rádovo 10^6 Pa.

V dôsledku toho je treba k zapáleniu xenónovej výbojky vyššie napätie. Hustota plynu sa v xenónových výbojkách takmer nemení. Nezávisí na teplote banky a preto dosiahne výbojka plného výkonu okamžite po zapnutí. Žiarenie týchto výbojok má spojité spektrum, vlnová dĺžka infračerveného žiarenia vyžiareného xenónom sa pohybuje od 0,8 do $1,0\mu\text{m}$.

Xenónové výbojky sa využívajú k budeniu aktívneho prostredia lasérov a v poslednej dobe sa uplatňujú v svetlometoch automobilov.

1.5.3.5 Zábleskové výbojky

Zábleskové výbojky vydávajú veľký svetelný tok za veľmi krátky časový úsek.

Elektrický výboj plynu u zábleskovej výbojky má tri štádiá:

- a) *štádium zapálenia výboja* – ním sa vytvoria vhodné podmienky k zapáleniu hlavného výboja

b) *hlavné štádium* – prúd v obvode je veľmi vysoký a výbojka vyžaruje veľký svetelný tok

c) *konečné štádium* – výboj sa postupne vytráca

Najvýznamnejšou charakteristikou zábleskovej výbojky je tzv. *čas záblesku*.

Rozumieme ním dobu, pre ktorú je uvažovaná žiarivá veličina X (množstvo žiarenia, žiarivý tok, atď.) väčší ako určená hodnota, obvykle $\frac{1}{e}$ amplitúdy. Celková hodnota okamžitej hodnoty žiarivej veličiny X počas doby jedného záblesku je daná vzťahom $\int_0^t X dt$ a nazýva sa *energia záblesku*.

Zábleskové výbojky sú väčšinou špeciálne upravené xenónové výbojky. Sú k osvetleniu fotografovaných objektov (blesk u fotoaparátu), ako súčasť prístrojov k meraniu vzdialeností a v oblasti infračerveného žiarenia k optickému budeniu laséru pracujúceho v infračervenej oblasti.

1.5.3.6 *Optické kvantové generátory(laséry), pracujúce v infračervenej oblasti spektra*

Pod pojmom optický kvantový generátor alebo lasér rozumieme žiarenie, ktorého činnosť spočíva v zosilňovaní žiarenia stimulovanou emisiou. Laséry vysielajú koherentné žiarenie a je treba podotknúť, že aj v infračervenej oblasti, kde ostatné zdroje vysielajú žiarenie, ktoré nie je koherentné.

Laséry sú zdroje žiarenia, u ktorých sa energia budiaceho zdroja mení na energiu vysielanú v podobe žiarenia na princípe stimulovanej emisie. V dôsledku toho je žiarenie vydávané lasérmi koherentné a vyznačuje sa veľkou hustotou žiarivého toku.

Napríklad najvýdatnejší zdroj žiarenia Slnko (teplota 6000K a intenzita vyžarovania $7 kW \cdot cm^{-2}$) má spektrálnu hustotu vyžarovania pri vlnovej dĺžke rádovo $1 cm^2$. V súčasnej dobe sú laséry schopné dodať v záblesku výkon rádovo v tisícoch magawattov, pri ožarovanej ploche približne $1 cm^2$. Toto žiarenie je možné charakterizovať intervalom vlnových dĺžok $\Delta\lambda = 10^{-8} - 10^{-9} \mu m$. Inak povedané, spektrálna hustota lasérov je milión až miliárdkrát väčšia, ako je tomu u Slnka [1] [4].

1.6 Senzory a ich kategórie

Triedenie senzorov je robené z veľa hľadísk. Medzi základné úvodné hľadisko zaradíme delenie senzorov podľa využívaného **fyzikálneho princípu**.

Rozdelenie senzorov môžeme deliť tiež podľa:

- **druhu vonkajších podnetov**, tj. meraných veličín, napr. teplota, tlak, prietok, mechanické veličiny (posunutie, rýchlosť, poloha, zrýchlenie, sila, mechanické napätie), radiačné veličiny elektromagnetického žiarenia, zloženie a vlastnosti látok, elektrické veličiny (napätie, prúd, frekvencia, fázový posun, výkon energie), teplo, apod.
- **styku s meraným prostredím** (bezdotykové, dotykové)
- **druhu zmien parametrov senzora pri pôsobení vonkajšieho podnetu**: aktívne senzory, kde pôsobenie vonkajšieho podnetu generuje v senzore elektrickú energiu (napr. termočlánok, fotočlánok, piezoelektrický kryštál, indukčný tachogenerátor) alebo pasívne senzory, ktoré pôsobením vonkajšieho podnetu mení senzor svoje parametre (elektrický odpor, indukčnosť, kapacitu)[6].

1.7 Senzory infračerveného žiarenia

Skôr ako sa zmienime o jednotlivých používaných princípoch senzorov, zmienime sa

Krátko o spoločných základných parametroch senzorov žiarenia. Tieto parametre predstavujú kritériá pre predbežný výber určitej skupiny senzorov pre danú aplikáciu. Ide o päť parametrov: *integrálna citlivosť* K , *spektrálna citlivosť* K_λ , *relatívna spektrálna citlivosť* S_λ , *ekvivalentný šumivý výkon* NEP (*Noise Equivalent Power*) a *detektivita* D .

- *Integrálna citlivosť* je daná podielom elektrického signálu U na výstupe senzoru a žiarivého toku Φ dopadajúceho na citlivú plochu senzoru:

$$K = \frac{U}{\Phi} \quad [V \cdot W^{-1}] \quad (1.22)$$

- *Spektrálna citlivosť* udáva závislosť citlivosti senzoru na vlnovú dĺžku λ :

$$K_\lambda = \frac{U}{\Phi_\lambda} \quad [V \cdot W^{-1}] \quad (1.23)$$

- *Relatívna spektrálna citlivosť* je daná vzťahom:

$$S_\lambda = \frac{K}{K_{\lambda \max}} \quad (1.24)$$

- NEP (*Noise Equivalent Power*) udáva žiarivý tok, pri ktorom je hodnota výstupného signálu U práve rovná efektívnej hodnote spektrálnej hustoty šumového napätia.

- *Detektivita* D (detekčná schopnosť, merná deaktivita) je definovaná ako prevrátená hodnota NEP , teda $D = 1/NEP$. V praxi sa obvykle táto veličina vzťahuje k odmocnine citlivej plochy senzoru a značíme ju D^*

Existuje niekoľko kategórii senzorov pre infračervené žiarenie podľa fyzikálneho princípu premeny energie fotónov s príslušnou vlnovou dĺžkou na snímanú veličinu. V zásade môžeme potom deliť senzory na **tepelné** a **kvantové** [5].

1.7.1 Tepelné senzory infračerveného žiarenia

U tepelných senzorov absorbovaná energia fotónov ohreje citlivú časť prevodnej sústavy senzora a vyvolané zvýšenie teploty sa potom meria teplotným senzorom. Sem patria **termočlánkové batérie**, **bolometre** a **pyroelektrické senzory**.

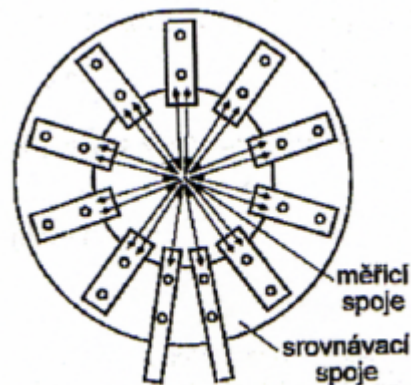
Termočlánková batéria je tvorená sériovo radenými termočlámkami v podobe diskretných kovových pásov zhotovených technológiou tenkých vrstiev alebo je termočlánok realizovaný ako monolitický kremíkový blok, teda polovodičovou technológiou na veľmi tenkej kremíkovej membráne (o hrúbke 5-10 μm) kvôli zníženiu tepelného vyrovnávajúceho toku medzi meracím a vyrovnávajúcim spojom. Ako elementy termoelektrického článku sa používajú dvojice Bi-Sb, Si_p -Al, Si_a -Au, Si_p /Au. Jedným z možných kritérií pre výber materiálu elementu je hodnota parametru Z , ktorá je vyjadrená vzťahom

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\kappa} \quad (1.25)$$

Kde α je Seebeckov koeficient

σ merná vodivosť

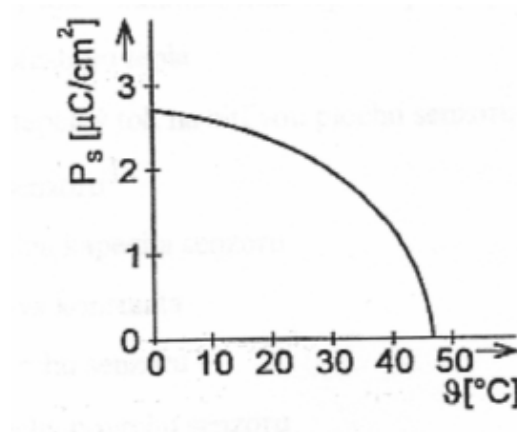
κ tepelná vodivosť



Obr.2 Termočlánková batéria [4]

Bolometre sú založené na princípe odporových senzorov teploty. Používajú sa odporové materiály na báze kysličníku MgO, MnO, NiO, TiO_2 , $\text{Tl}_2\text{SeAs}_2\text{Te}_3$ (chalkogenidové sklo) nanesené na tenké elektricky nevodivé podložke tlmene na masívnom kovovom bloku.

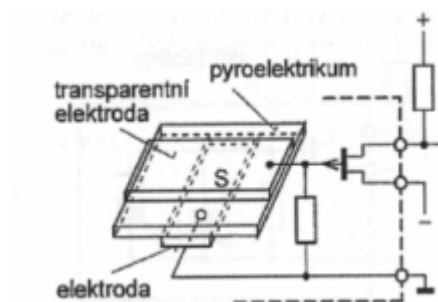
Pyrometrické senzory využívajú pyroelektrického javu, čo je zmena spontánnej polarizácie P_s [$\mu\text{C}/\text{cm}^2$] doménovej štruktúre materiálu pri zmene teploty. Tieto materiály sú všeobecne pyroelektrika s trvalou polarizáciou alebo niektoré fotoelektriká s doménami orientovanými v silnom elektrickom poli. Obvykle sa používajú tieto materiály: TGS (triglycym sulfán), PZT keramika (keramické látky na báze titaničitanu a zirkoničitanu olovnatého $\text{PbTi}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_3$), LiTaO_3 (lithium-tantalát), PVDF (polyvinylfluorid).



Obr.3 Závislosť $P_s = f(T)$ materiálu TGS [4]

Základným parametrom pyroelektrického senzoru teploty je pyroelektrický koeficient p , definovaný vzťahom:

$$p = \left(\frac{\partial P_s}{\partial T} \right)_T \quad (1.26)$$



Obr.4 Pyroelektrický čip s predzosilňovačom [4]

Pyroelektrický senzor sa skladá z dvoch elektród, z ktorých čelná musí byť transparentná pre infračervené žiarenie. Senzor si teda môžeme predstaviť kondenzátor, na ktorého elektródach sa pri zmene polarizácie v pyroelektriku naindikuje elektrický náboj. Ten odteká cez svodový odpor pyroelektrika a cez vstupný odpor predzosilňovača. Pred

každým odberom náboja (resp. prúdu alebo náboja) je nutné žiarenie dopadajúce na senzor prerušiť, tj. automatickým prerušovačom zacloniť a opäť odcloniť.

Pre tepelnú rovnováhu platí:

$$\alpha \cdot \Phi_D = m \cdot c \cdot d\vartheta_s + k \cdot S \cdot d\vartheta_s \quad (1.27)$$

alebo

absorbovaný tok + akumulované teplo = prestup tepla zo senzora,

kde:

- α je súčiniteľ prestupu tepla
- Φ_D dopadajúci tepelný tok na citlivý plochu senzoru
- m hmotnosť senzoru
- c merná tepelná kapacita senzoru
- k Stefan-Boltzmannova konštanta
- S plocha povrchu senzora
- ϑ_s teplota plochy povrchu senzora

Pokiaľ je dopadajúci žiarivý tok harmonický alebo modulovaný uhlovým kmitočtom ω , tak sa dá efektívna hodnota napätia U_{ef} na senzore vyjadriť nasledujúcim vzťahom:

$$U_{ef} = \frac{\alpha \cdot \Phi_{Def} \cdot p(T)R\omega}{k\sqrt{1 + \omega^2\tau_T^2}\sqrt{1 + \omega^2\tau_E^2}} \quad (1.28)$$

kde τ_T je tepelná časová konštanta

τ_E elektrická časová konštanta

U materiálu, ktorý vykazuje pyroelektrický jav sa vždy prejavuje parazitný piezoelektrický jav. Tento jav pri deformáciách spôsobenými napr. otrasmi, zanáša systematickú chybu, takže senzory musia mať kompenzáciu, väčšinou substraktívnu.

1.7.2 Kvantové senzory infračerveného žiarenia

Kvantové senzory využívajú fyzikálnych javov vznikajúcich pri priamej interakcii dopadajúcich fotónov na štruktúru senzorov. Tieto senzory sú zhotovené výhradne z polovodičov a ich voľba závisí na šírke zakázaného pásu daného polovodiča, tj.

$W_g < \frac{1,24}{\lambda}$. Pre vysoké nároky na odstup signálu od šumu je nutné senzory chladiť.

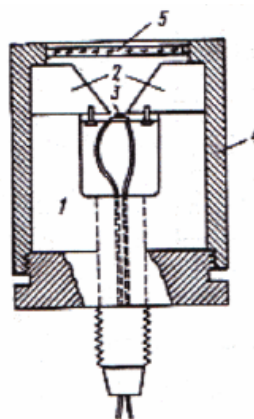
Používajú sa podobne ako senzory pyroelektrické pre termovizné snímanie obrazu a majú I ďalšie široké uplatnenie.

1.7.2.1 Fotogalvanometrický snímač

Tento snímač vykazuje citlivosť v celej infračervenej oblasti. Činnosť snímača je založená na fotogalvanometrickom jave, ktorý popísali Kikoin a Noskov v roku 1913.

Pri umiestnení polovodičového kryštálu do magnetického poľa, pohltitím fotónov a energiou vyššou ako energia, ktorú potrebuje elektrón k prekonaniu zakázaného pásu, sa vytvorí v blízkosti povrchovej vrstvy polovodiča, na ktorý dopadá merané žiarenie, elektrónovej a dierovej hladiny. Tým vznikne zvýšená koncentrácia elektrónov a dier a difúzny elektrický prúd. Pokiaľ je pri tom magnetické pole orientované v smere kolmice k dopadajúcemu žiareniu, elektróny a diery sa rozdelia, pričom sa voľné nosiče odchyľia k protiahlým koncom kryštálu polovodiča.

Väčšina fotogalvanometrických snímačov používa monokryštál antimonidu india (InSb), dokonalo čistý o rozmeroch 1–2mm³, umiestnený medzi pólami permanentného magnetu.

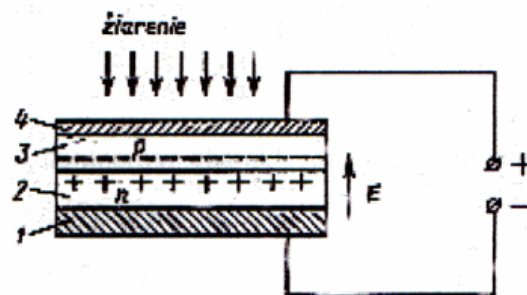


Obr. 5 Schéma konštrukcie fotogalvanometrického snímača [4]

Rez snímačom je znázornený na obrázku 5. Magnet 1 je zložený zo zliatin železa, niklu a hliníku a násadky 2 sú z mäkkého železa s malým magnetickým odporom. Kryštál InSb 3 je upevnený na podložke, od nej je elektricky izolovaný. Z protiahlých koncov kryštálu v smere kolmom na magnetické pole a na dopadajúci žiarivý tok sú pripojené vývody. Teleso 4 je hermeticky uzatvorené. Žiarenie dopadá na citlivý článok cez okno 5, ktoré prepúšťa infračervené žiarenie v pásme citlivosti InSb. Najvyššiu citlivosť vykazuje pre $\lambda = 6,2\mu m$.

1.7.2.2 Hradlové fotónky

Hradlovými fotónkami nazývame snímače, u ktorých pohltené žiarenie vyvoláva napätie v okolí PN prechodu. Základ hradlovej fotónky tvoria vrstvy oboch vodivostí polovodičového materiálu, ktoré tvoria PN prechod. Na obrázku 6 je schéma hradlovej fotónky. Na kovovej podložke 1 (nepriepustná elektróda) je nanosená tenká vrstva polovodiča vodivosti N 2 a na nej je nanosená vrstva polovodiča P 3. Na tieto vrstvy je nanosená tenká priesvitná vrstva kovu (zlato, platina), čo tvorí druhú elektródu 4.



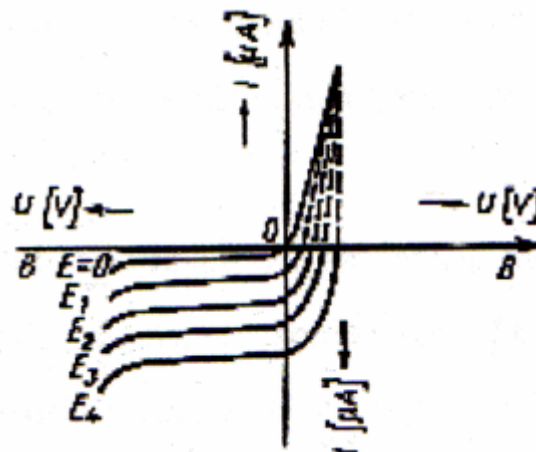
Obr.6 Schéma hradlovej fotónky [4]

V mieste styku dvoch polovodičových vrstiev 2 a 3 sa vytvorí PN prechod a vzniká elektromotorické napätie E , orientované od vrstvy N k vrstve P. Pri ožiarení fotónky uvoľňujú kvanta energie pohltenej v blízkosti diery a elektrónov. Elektróny prejdú do oblasti N ako vedľajšie nosiče a diery zostanú v oblasti P ako hlavné nosiče, pre ktoré predstavuje elektrické pole E potenciálovú bariéru. Dôsledkom toho vytvorí koncentrácia voľných elektrónov a dier rozdiel potenciálov na elektródach snímača, ktorý je tým väčší, čím viac fotónov bolo pohltené citlivou plochou.

Ako snímače infračerveného žiarenia sa používajú fotónky zo sulfidu talného (TIS) a sulfidu strieborného (Ag_2S). Najcitlivejšie sú tieto fotónky pri vlnovej dĺžke $\lambda = 1\mu\text{m}$.

1.7.2.3 Fotodiódy

Fotodióda predstavuje PN prechod sériovo zapojený v obvode, ktorý je zložený zo Zdroja hradlového napätia a odporu zát'aže. Pokiaľ na snímač nedopadá žiarenie, preteká obvodom prúd v nepriepustnom smere, vyvolaný teplotnou difúziou vedľ'ajších nosičov prúdu. Pri ožiarení diódy pohltením energie vo forme fotónov sa uvádza do pohybu elektróny a diery. Poblíž PN prechodu sa elektróny a diery rozdelia. Vedľ'ajšie nosiče sú unesené polom prechodu a hlavné nosiče, ktoré zostali pri prechode, vytvoria objemový náboj, ktorý je unášaný polom v opačnom smere[4],[5].



Obr. 7 Voltampérové charakteristiky germániovej fotodiódy [4]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

2 PRAKTICKÁ ČASŤ

2.1 Princíp meracej metódy

V mojej práci som sa snažil čitateľov oboznámiť s vlastnosťami infračerveného žiarenia. Základom bolo nájsť vhodné typy senzorov, k meraniu blízkej infračervenej oblasti. Ku skúšobným meraniam som použil dve fotodiódy. Prvú s citlivostnou vlnovou dĺžkou od 400 do 1100 nm a druhú s infračerveným priepustným filtrom od 700 do 1100 nm, ktoré ku svojej činnosti využívajú PN prechod upravený tak, aby naň mohlo dopadať infračervené žiarenie. Po osvetlení získavajú elektróny vyššiu energiu a prechádzajú do oblasti typu N a diery do oblasti typu P. Na každej strane PN prechodu tak vznikne elektrický náboj, ktorý som na vývodoch fotodiódy detekoval. Tieto senzory som zapojil do elektrického obvodu, kde z dôvodu zosilnenia ich výstupného signálu som použil operačný zosilňovač v invertujúcom zapojení.

Meriam výstupné napätie senzora, ktorý funguje ako prevodník žiarivého toku infračerveného žiarenia na napätie. Mnou vybrané zdroje produkujú elektromagnetické žiarenie rôznych vlnových dĺžok, ale primárna časť ich energie je produkovaná v blízkej infračervenej oblasti, čo predstavuje pracovné spektrum vybraných senzorov. Dávky infračerveného žiarenia som skúšal merať z prírodného a umelého zdroja v rôznych podmienkach. Namerané napätia oboch fotodiód som zapisoval a vyhodnocoval.

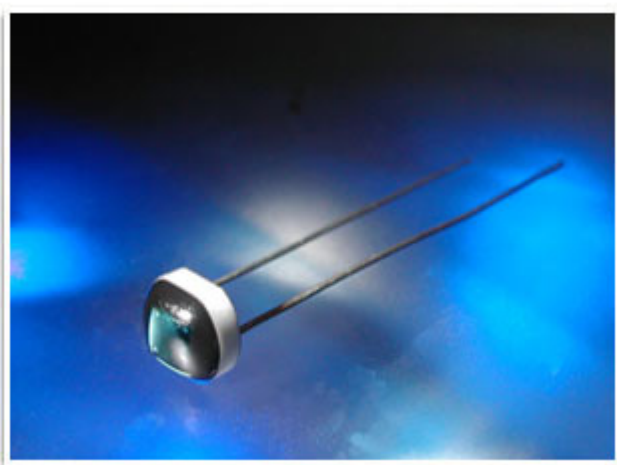
2.2 Vybraný senzor a jeho popis

Pri výbere senzorov som sa snažil o to, aby boli schopné čo najcitlivejšie prijímať infračervené žiarenie a to v jeho blízkej oblasti, čo predstavuje rozpätie od 700nm do 1400nm. Ďalej som dbal na ich dostupnosť a cenu.

Postupom času sa okruh vhodných senzorov znížil na súčiastky od troch spoločností. Firma **Sensors-Consult**, poskytovala senzory vhodných vlnových dĺžok, spolu aj so zdrojmi infračerveného žiarenia. Cena infračerveného snímača typu SPT3A sa pohybuje od 1570 až 1810 Kč podľa jeho dĺžky kábla.

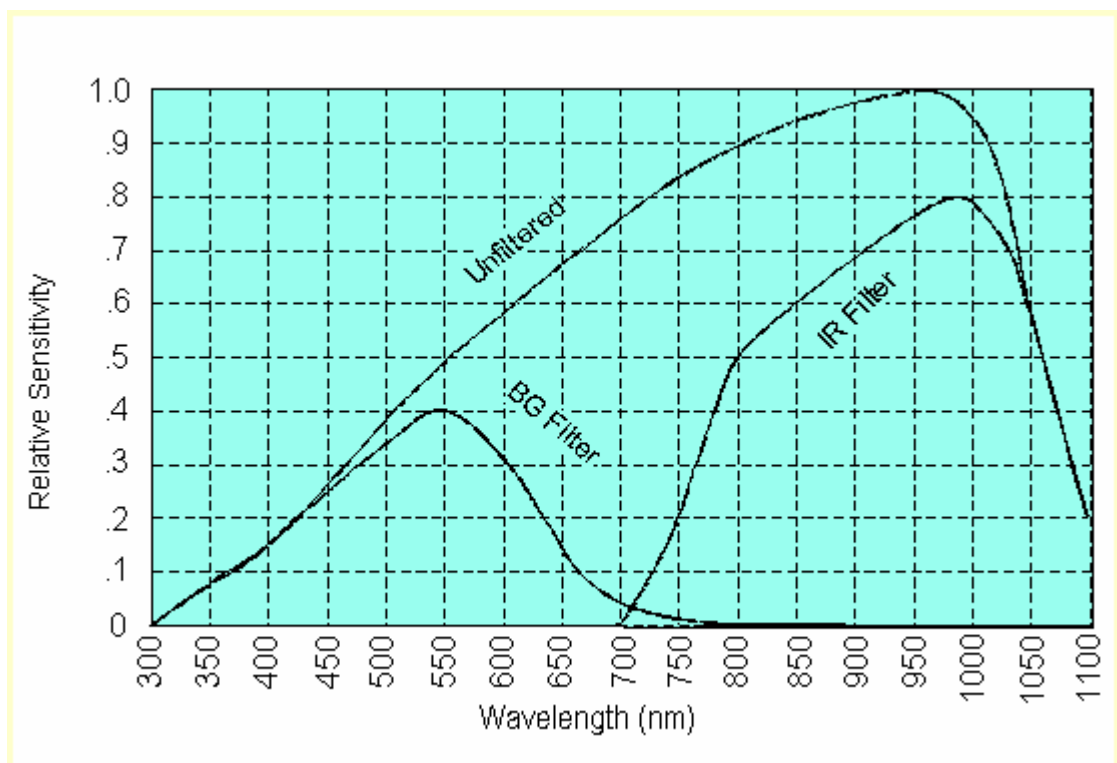
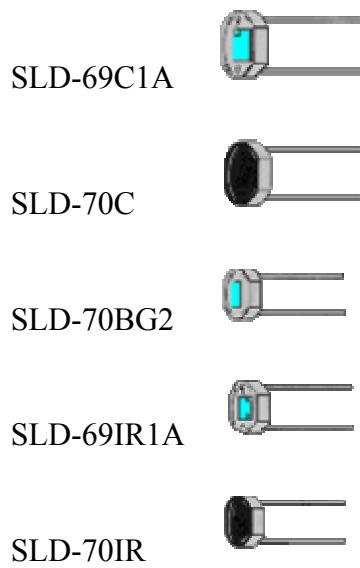
Nemecká spoločnosť **Endrich** spĺňovala všetky podmienky, avšak senzory dodávala iba po 500 kusoch, čo v našom prípade bol dosť závažný problém.

S ohľadom na tieto skutočnosti bol vybraný senzor od spoločnosti **Silonex**, ktorá si už vybudovala solidnú reputáciu. Jej odborné znalosti v oblasti optických snímačov spĺňujú najnáročnejšie podmienky pre ich aplikáciu. Zložitou úlohou bolo dosiahnuť dobrú citlivosť a vysoký výkon fotodiód a to aj z ekonomického hľadiska. Spoločnosť Silonex bola úspešná vo výrobní oblasti fotodiód s IR a BG optickými filtrami. Toto je prínosom obzvlášť, keď filtre sú aplikované na čip so správnou citlivosťou k prijímaniu svetelného zdroja, alebo k rozlíšeniu medzi dvoma rôznymi zdrojmi svetla. Citlivosť na biele svetlo bude znížená v závislosti na hrúbke filtru. IR filtre sú používané, aby mohli rozlíšiť signál, ktorý je v rôznych svetelných podmienkach [8].



Obr.8 Keramická fotodióda od spoločnosti Silonex[8]

Ponuka fotodiód od spoločnosti Silonex:



Obr.9 Účinky filtrov fotodiód [8]

K môjmu meraniu som si vybral 2 fotodiódy, a to SLD-69C1A a SLD-69IR1A.

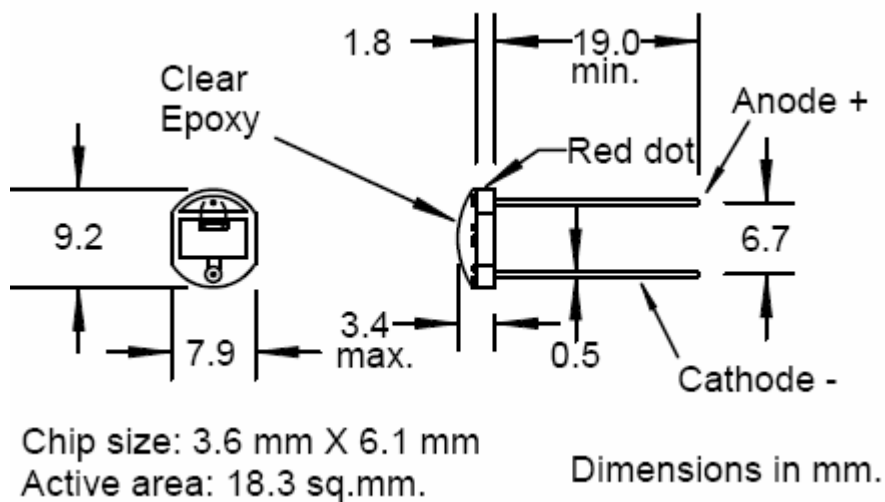
2.2.1 Fotodióda SLD-69C1A

Rysy:

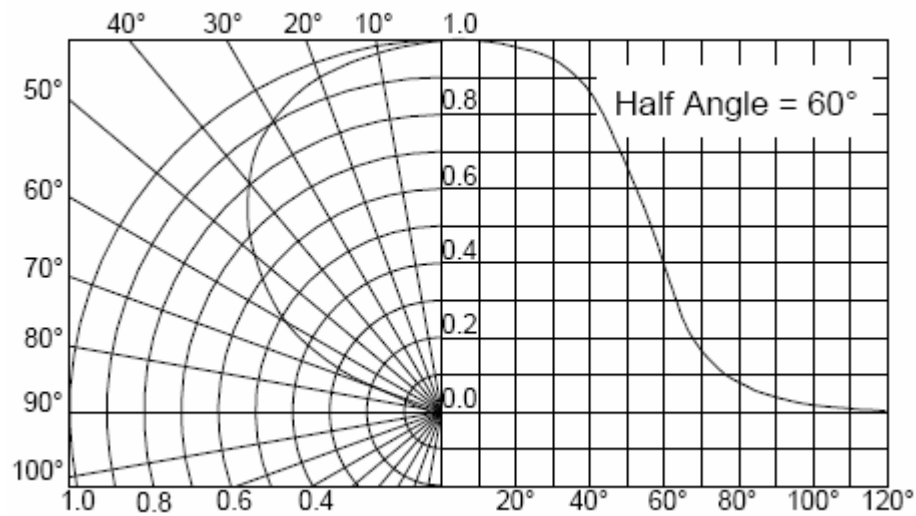
- rovinná fotodióda
- široký prijímací uhol žiarenia
- veľké aktívne oblasti čipu
- nízky unikajúci prúd
- lineárna závislosť k ožiareniu
-

Popis:

Fotodióda je určená pre prácu vo fotovoltaickom alebo fotovodivostnom móde. Vysoká citlivosť a nízky prúd za tmy umožňuje jej použitie aj v ľahších aplikáciách. Fotodióda je dodávaná na keramickom základe s čistou epoxidovou klembou a má veľkú meraciu plochu 3,6mm × 6,1mm.



Obr.10 Fotodióda typu SLD-69C1A [8]



Obr.11 Citlivostná charakteristika fotodiódy SLD-69C1A [8]

Absolútne maximálne rebríčky:

Skladovacia teplota -20 ° C až + 75 ° C

Pracovná teplota -20 ° C až + 75 ° C

Pájacia teplota(3) 260 ° C

Poznámky:(1) E_e = svetelný zdroj @ 2854 °K(2) E_e = svetelný zdroj @ 880 nm [8]V tabuľke sú uvedené elektrické parametre pri izbovej teplote $T_A = 25^\circ\text{C}$.

Tab.1 Elektrické parametre senzoru SLD-69C1A [8]

Symbol	Parameter	MIN	TYP	MAX	Jednotky	Skušobné podmienky
I_{SC}	prúd nakrátko	600	900	-	μA	$V_R = 0V$, $E_e = 25mV \cdot cm^{-2}$ (1)
V_{OC}	svorkové napätie	-	0,4	-	V	$E_e = 25mV \cdot cm^{-2}$ (1)
I_D	Prúd za tmy	-	-	100	nA	$V_R = 0,1V$, $E_e = 0$
C_J	Svorková kapacitancia	-	350	-	pF	$V_R = 0V$, $E_e = 0$, $f = 1MHz$
t_R	Doba nábehu	-	8	-	μs	$V_R = 10V$, $R_L = 1K\Omega$ (2)
t_f	Doba dobehu	-	10	-	μs	$V_R = 10V$, $R_L = 1K\Omega$ (2)
V_{BR}	Obrátené prierazné napätie	-	50	-	V	$I_R = 100\mu A$
λ_p	Max.citlivosť na vlnovú dĺžku	-	930	-	nm	-
λ_R	Citlivostná vlnová dĺžka	400	-	1100	nm	-
TC _i	Teplný koeficient	-	+0.2	-	%/°C	(1)
$\theta_{1/2}$	Prijímací polovičný uhol	-	60	-	deg	-

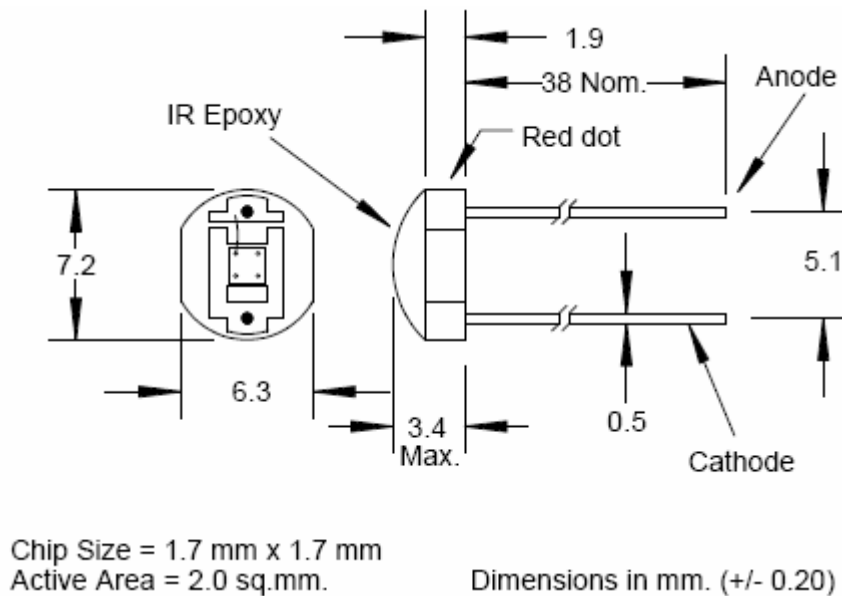
2.2.2 Fotodióda SLD-69IR1A

Risy:

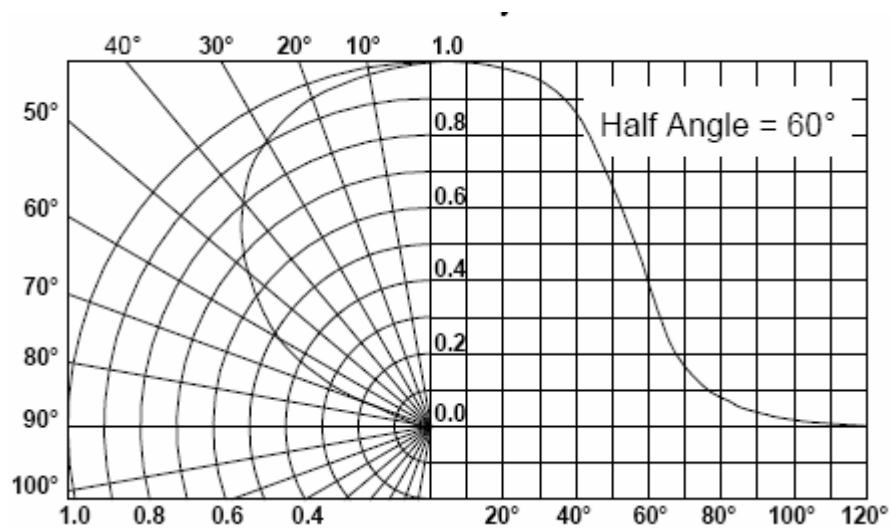
- nízky unikajúci prúd
- lineárna závislosť k ožiareniu
- filter prepúšťajúci IR žiarenie

Popis:

Táto fotodióda je navrhnutá k maximálnej schopnosti reagovať na obdržanú energiu infračerveného spektra. Je dodávaná na keramickej báze s infračervenou epoxidovou kľombou, ktorá neprepúšťa viditeľné svetlo. Fotodiódy môžu pracovať buď vo fotovoltaickom alebo fotovodivostnom móde. Vysoká citlivosť a nízky temný prúd dovoľuje používať aj slabé žiariace aplikácie.



Obr.12 Fotodióda typu SLD-69IR1A [8]



Obr.13 Citlivostná charakteristika fotodiódy SLD-69IR1A [8]

Absolútne maximálne rebríčky:

Skladovacia teplota	-20 ° C až + 85 ° C
Pracovná teplota	-20 ° C až + 85 ° C
Pájacia teplota(1)	260 ° C

Poznámky:

(2) E_e = svetelný zdroj @ 2854 °K

(3) E_e = svetelný zdroj @ 880 nm [8]

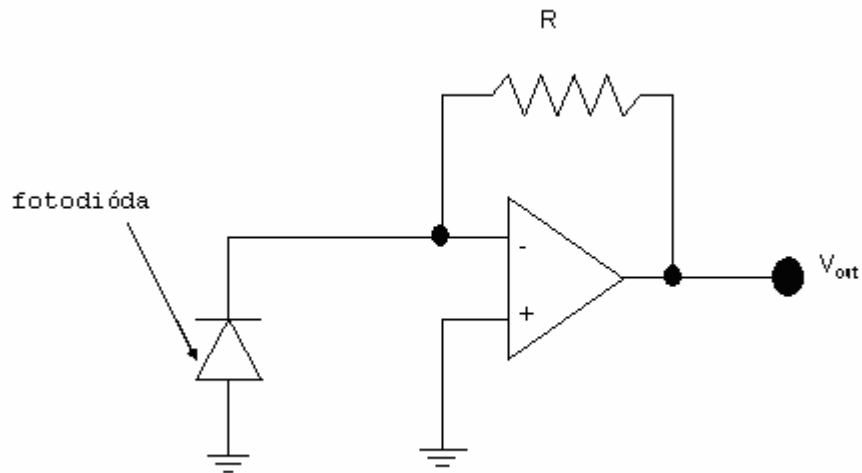
V tabuľke sú uvedené elektrické parametre pri izbovej teplote $T_A = 25^\circ\text{C}$.

Tab.2 Elektrické parametre senzoru SLD-69IR1A [8]

Symbol	Parameter	MIN	TYP	MAX	Jednotky	Skušobné podmienky
I_{SC}	prúd nakrátko	600	100	-	μA	$V_R = 0V$, $E_e = 25mV \cdot cm^{-2}$ (2)
V_{OC}	svorkové napätie	-	0,4	-	V	$E_e = 25mV \cdot cm^{-2}$ (2)
I_D	Prúd za tmy	-	-	100	nA	$V_R = 100mV, E_e = 0$
C_J	Svorková kapacitancia	-	50	-	pF	$V_R = 0V, E_e = 0$, $f = 1MHz$
t_R	Doba nábehu	-	1	-	μs	$V_R = 5V, R_L = 1K\Omega$ (3)
t_f	Doba dobehu	-	1,5	-	μs	$V_R = 5V, R_L = 1K\Omega$ (3)
V_{BR}	Obrátené prierazné napätie	-	50	-	V	$I_R = 100\mu A$
λ_p	Max.citlivosť na vlnovú dĺžku	-	990	-	nm	-
λ_R	Citlivostná vlnová dĺžka	700	-	1100	nm	-
TC _I	Teplotný koeficient	-	+0.2	-	%/°C	(2)
$\theta_{1/2}$	Prijímací polovičný uhol	-	60	-	deg	-

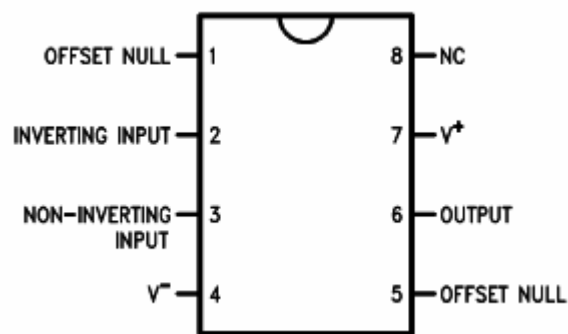
2.3 Elektrické zapojenie senzoru

Fotodiódu som zapojil k operačnému zosilňovaču LM 741CN v invertujúcom zapojení, čím som dosiahol vysokú hodnotu napät'ového zosilnenia s použitím spätnej väzby.



Obr.14 Funkčná schéma elektrického zapojenia senzora

Fotodiódu som zapojil medzi invertujúci vstup a zem, neinvertujúci vstup je spojený so zemou. Na vývody pre pripojenie zdroja záporného a kladného napájacieho napätia som zapojil 9V . Napät'ový výstup je privedený na voltmeter, odkiaľ sú odčítané namerané hodnoty.



Obr.15 Usporiadanie operačného zosilňovača LM 741CN v púzdre [10]

2.4 Meranie

Po vybratí vhodných fotodiód a ich následnému zapojeniu som spravil pár skušobných meraní. Použil som dva druhy zdroja.

Z prírodného som si vybral Slnko, pretože predstavuje najvýdatnejší zdroj žiarenia, vytvárajúci na povrchu Zeme intenzitu žiarenia $1,4kW \cdot m^{-2}$. Meral som v troch rôznych podmienkach s obomi fotodiódami.

Z umelého zdroja som použil žiarovku s volfrámovým vláknom. Jej výhodou je jednoduchá konštrukcia, použiteľnosť a ľahká dostupnosť. Pri tomto meraní som skúšal použiteľnosť mojich fotodiód na optické vlastnosti svetla, čo predstavuje absorpciu, odrazivosť a priepustnosť pri troch rôznych materiáloch s odlišnou vzdialenosťou od zdroja. Ďalej som skúsil zmerať ako sa veľmi oslabuje svetelný tok pri prechode žiarenia hrubo-disperzným systémom, čo v mojom prípade predstavovala para, vytvorená v provizorných podmienkach.

Na všetky merania som spravil desať pokusov a dodržiaval rovnakú teplotu okolia, pretože má vplyv na výstupné napätie.

Značenie použité v nasledujúcich tabuľkách a grafoch:

U - výstupné napätie fotodiódy

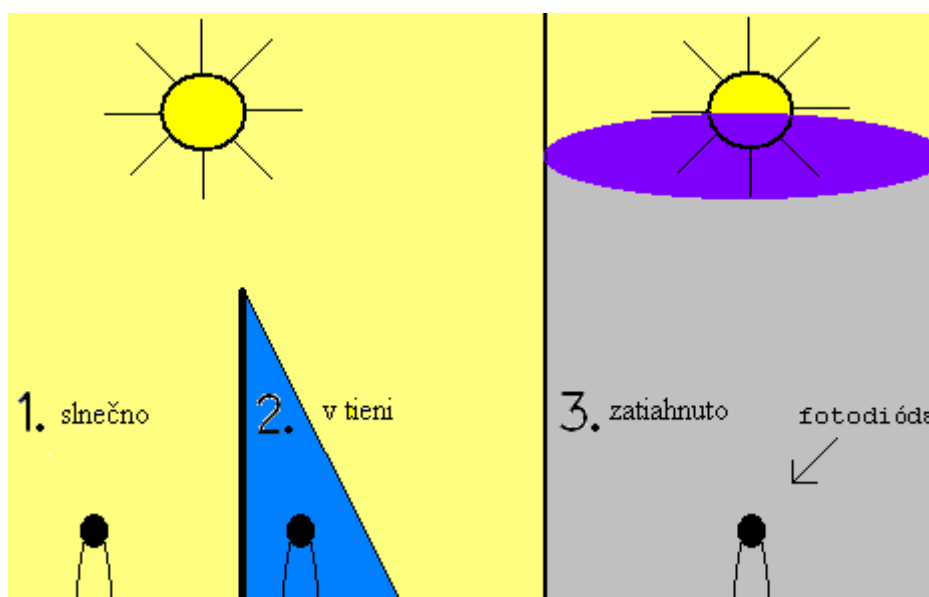
U_p - priemerná hodnota výstupného napätia

l - vzdialenosť zdroja od materiálu

2.4.1 Meranie s prírodným zdrojom žiarenia – Slnko

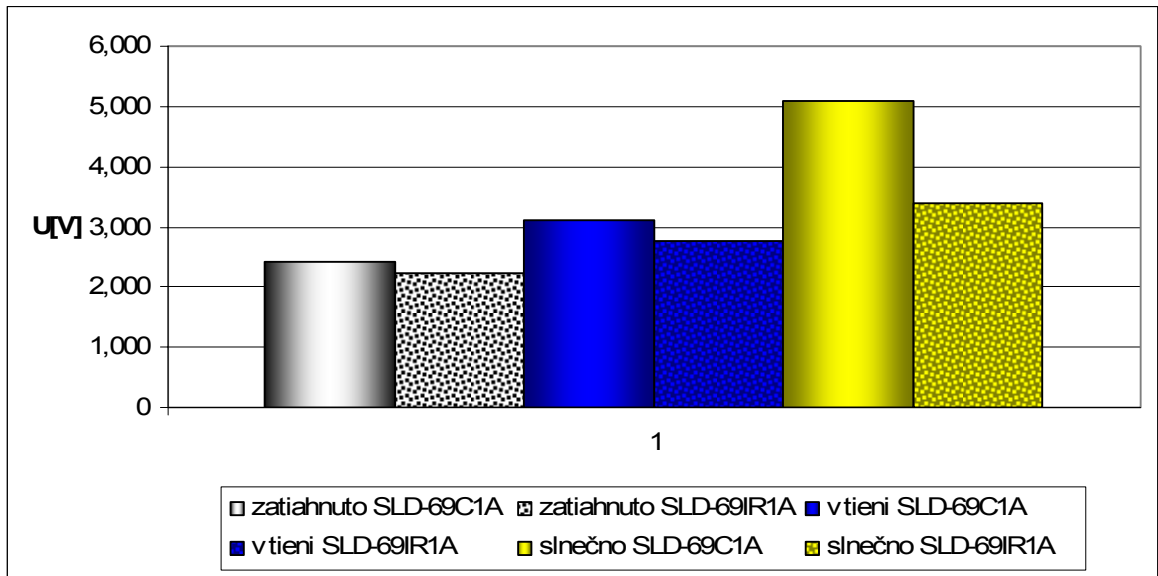
Pri tomto meraní som použil tri rôzne podmienky, v ktorých pracovali fotodiódy SLD-69IR1A a SLD-69C1A. V prvom prípade boli fotodiódy vystavené priamemu slnečnému svetlu, pri druhom boli v tieni a pri treťom bolo zatiahnuto (Obr.16).

Obr.16 Fotodiódy SLD-69IR1A a SLD-69C1A za troch rôznych slnečných podmienok

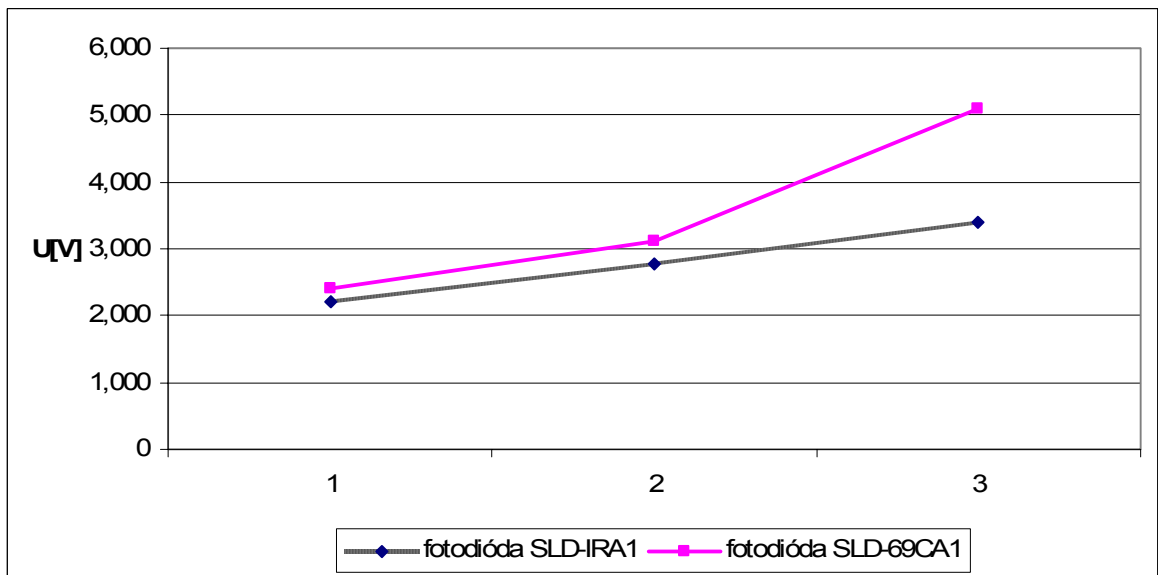


Tab.3 Výstupné napätia $U[V]$ slnečného žiarenia za troch rôznych podmienok merané fotodiódami SLD-69IR1A a SLD-69C1A

Počet meraní	zatiahnuto		v tieni		slnечно	
	69IR1A	69C1A	69IR1A	69C1A	69IR1A	69C1A
1	2,187	2,319	2,758	3,210	3,393	5,082
2	2,086	2,366	2,759	2,213	3,394	5,086
3	2,224	2,377	2,761	3,215	3,388	5,085
4	2,222	2,356	2,762	3,212	3,390	5,082
5	2,212	2,386	2,763	3,210	3,389	5,080
6	2,238	2,439	2,762	3,209	3,387	5,079
7	2,265	2,455	2,761	3,215	3,382	5,081
8	2,257	2,456	2,760	3,210	3,379	5,076
9	2,255	2,449	2,760	3,214	3,385	5,080
10	2,260	2,475	2,759	3,213	3,385	5,078
$U_p[V]$	2,221	2,408	2,761	3,112	3,387	5,081



Obr.17 Porovnanie výstupného napätia fotodiód SLD-69IR1A a SLD-69C1A za troch rôznych podmienok

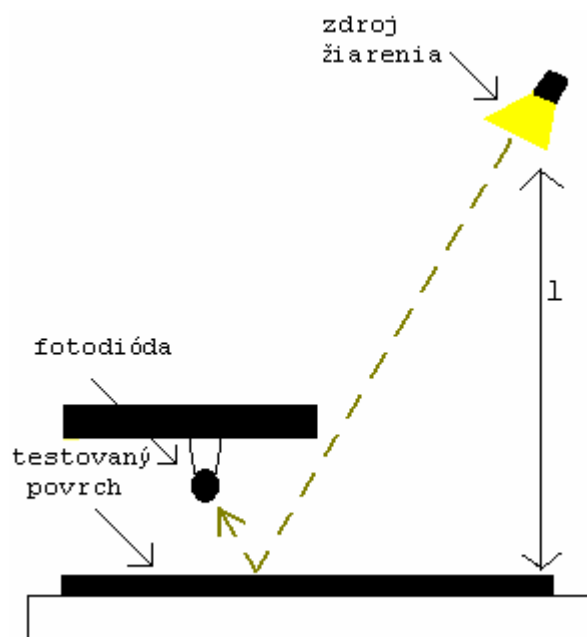


Obr.18 Závislosť výstupného napätia fotodiód SLD-69IR1A a SLD-69C1A od rôznych podmienok

2.4.2 Meranie s umelým zdrojom žiarenia – volfrámová žiarovka

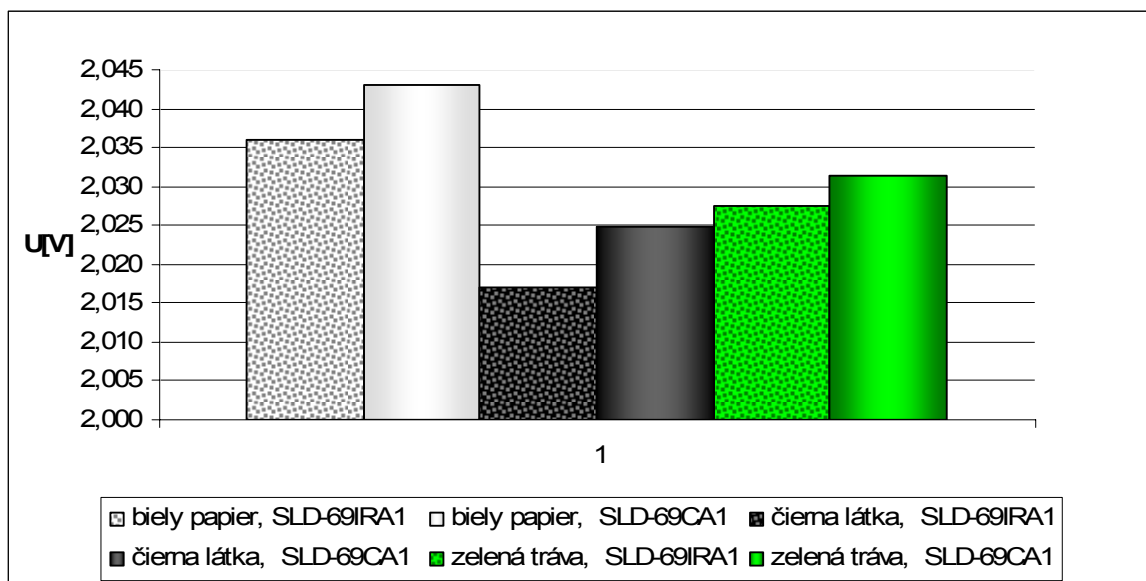
Pri tomto druhu merania som vyskúšal ako budú reagovať fotodiódy SLD-69C1A a SLD-69IR1A na optické vlastnosti svetla, teda odrazivosť, priepustnosť a pohltivosť. Použil som tri rôzne povrchy a to biely papier, čiernu látku a zelenú trávu. Povrchy sa od seba líšia farbou a geometrickou stavbou. Na tieto povrchy som nechal dopadať žiarivý tok z rôznych vzdialeností pod 45° k aktívnym zónam fotodiód, ktoré boli umiestené v tesnej blízkosti povrchu.

Obr.19 Meranie optických vlastností svetla pomocou fotodiód SLD-69IR1A a SLD-69C1A za použitia troch rôznych materiálov



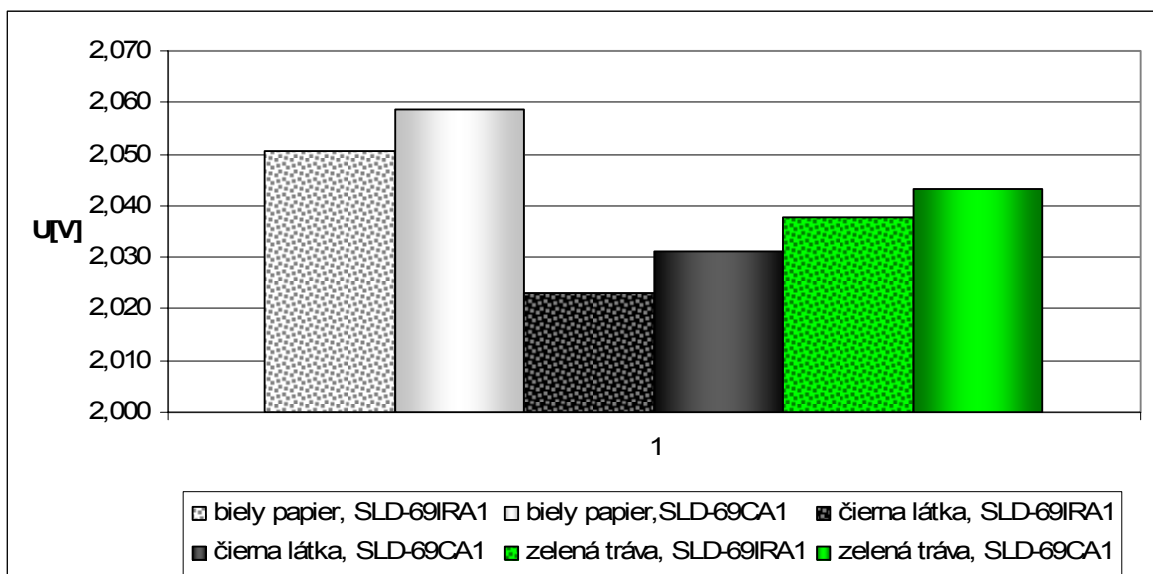
Tab.4 Namerané výstupné napätie $U[V]$, $l = 50cm$

Počet meraní	biely papier		čierna látka		zelená tráva	
	69IR1A	69C1A	69IR1A	69C1A	69IR1A	69C1A
1	2,035	2,042	2,017	2,025	2,027	2,032
2	2,036	2,042	2,017	2,025	2,027	2,031
3	2,037	2,043	2,018	2,024	2,028	2,031
4	2,036	2,043	2,017	2,025	2,028	2,031
5	2,036	2,043	2,016	2,025	2,027	2,032
6	2,035	2,044	2,017	2,024	2,027	2,031
7	2,035	2,042	2,017	2,025	2,028	2,032
8	2,036	2,044	2,018	2,025	2,028	2,032
9	2,036	2,043	2,016	2,026	2,027	2,031
10	2,037	2,044	2,017	2,025	2,027	2,032
$U_p[V]$	2,036	2,043	2,017	2,025	2,027	2,032

Obr.20 Porovnanie výstupného napätia fotodiód SLD-69IR1A a SLD-69C1A pre biely papier, zelenú trávu a čiernu látku, $l = 50cm$

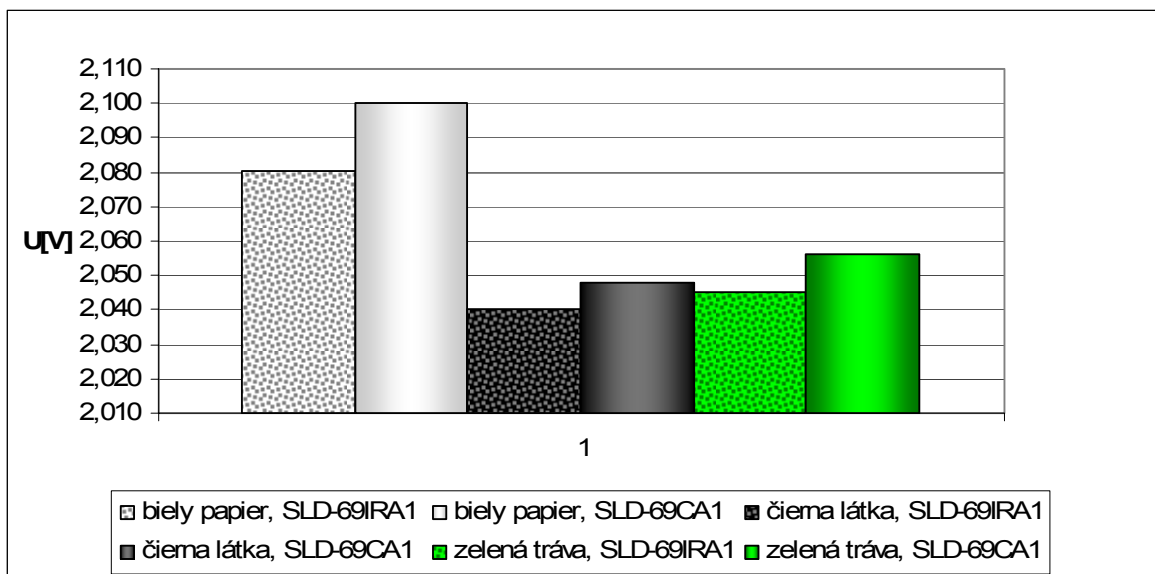
Tab.5 Namerané výstupné napätie $U[V]$, $l = 30\text{cm}$

Počet meraní	biely papier		čierna látka		zelená tráva	
	69IR1A	69C1A	69IR1A	69C1A	69IR1A	69C1A
1	2,050	2,058	2,023	2,032	2,037	2,043
2	2,049	2,059	2,024	2,031	2,038	2,043
3	2,051	2,058	2,023	2,031	2,038	2,045
4	2,050	2,059	2,023	2,031	2,038	2,042
5	2,051	2,060	2,023	2,032	2,037	2,042
6	2,050	2,060	2,022	2,030	2,039	2,044
7	2,051	2,058	2,024	2,031	2,037	2,043
8	2,051	2,058	2,023	2,032	2,038	2,044
9	2,050	2,059	2,023	2,031	2,037	2,043
10	2,051	2,058	2,022	2,032	2,038	2,042
$U_p[V]$	2,050	2,059	2,023	2,031	2,038	2,043

Obr.21 Porovnanie výstupného napätia fotodiód SLD-69IR1A a SLD-69C1A pre biely papier, zelenú trávu a čiernu látku, $l = 30\text{cm}$

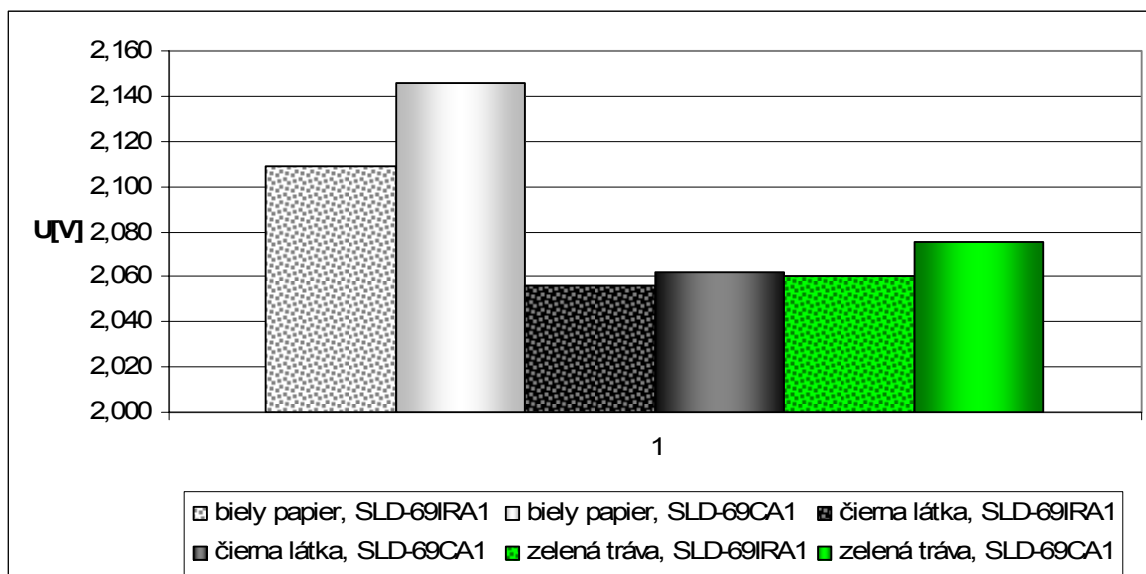
Tab.6 Namerané výstupné napätie $U[V]$, $l = 20\text{cm}$

Počet meraní	biely papier		čierna látka		zelená tráva	
	69IR1A	69C1A	69IR1A	69C1A	69IR1A	69C1A
1	2,082	2,102	2,040	2,048	2,045	2,056
2	2,076	2,103	2,041	2,047	2,044	2,056
3	2,080	2,097	2,040	2,048	2,045	2,056
4	2,079	2,098	2,040	2,047	2,046	2,056
5	2,081	2,097	2,039	2,048	2,045	2,056
6	2,082	2,096	2,040	2,047	2,046	2,056
7	2,079	2,100	2,041	2,047	2,046	2,056
8	2,080	2,101	2,041	2,049	2,044	2,056
9	2,084	2,101	2,039	2,048	2,046	2,056
10	2,082	2,106	2,040	2,048	2,046	2,056
$U_p[V]$	2,081	2,100	2,040	2,048	2,045	2,056


 Obr.22 Porovnanie výstupného napätia fotodiód SLD-69IR1A a SLD-69C1A pre biely papier, zelenú trávu a čiernu látku, $l = 20\text{cm}$

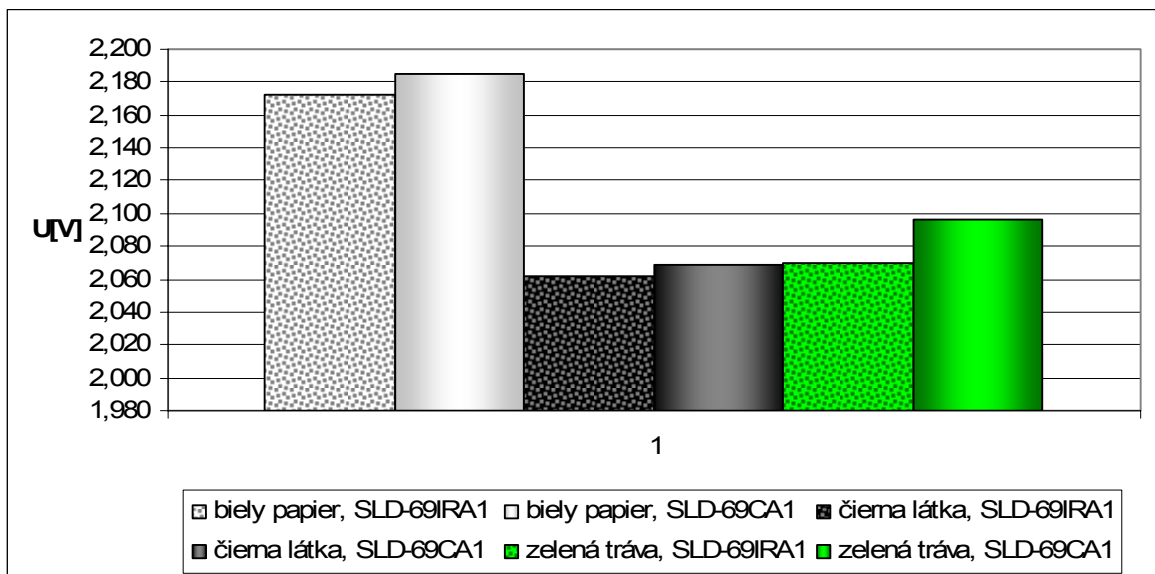
Tab.7 Namerané výstupné napätie $U[V]$, $l = 10\text{cm}$

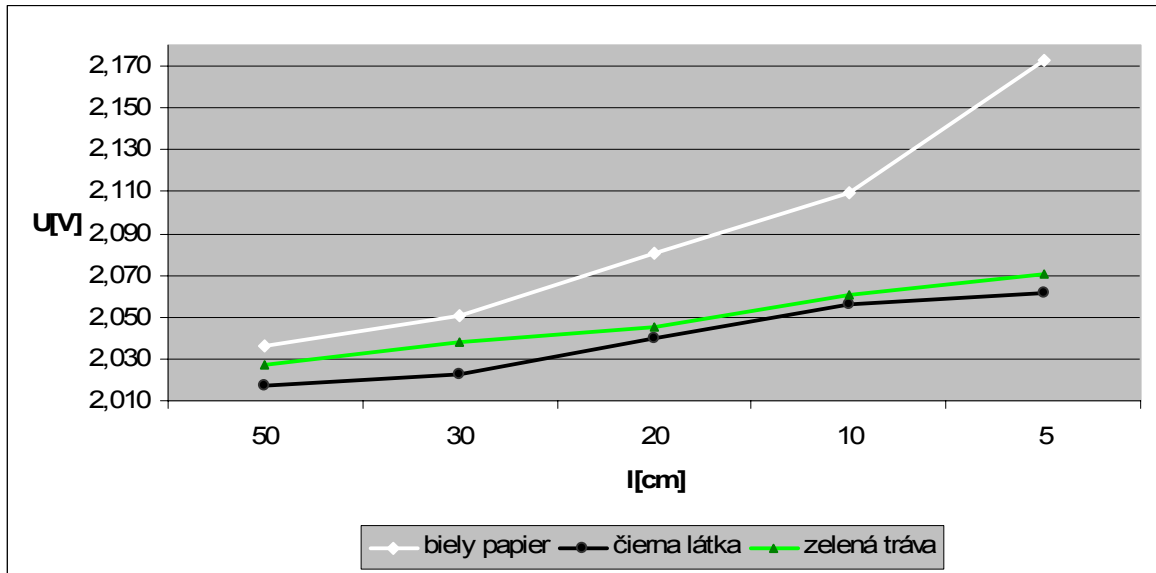
Počet meraní	biely papier		čierna látka		zelená tráva	
	69IR1A	69C1A	69IR1A	69C1A	69IR1A	69C1A
1	2,107	2,158	2,056	2,063	2,062	2,075
2	2,108	2,156	2,055	2,062	2,061	2,074
3	2,111	2,134	2,055	2,062	2,059	2,075
4	2,110	2,135	2,056	2,061	2,059	2,075
5	2,110	2,141	2,056	2,061	2,060	2,076
6	2,109	2,145	2,057	2,062	2,061	2,075
7	2,106	2,142	2,056	2,062	2,060	2,075
8	2,110	2,146	2,056	2,061	2,059	2,076
9	2,111	2,148	2,055	2,062	2,061	2,076
10	2,110	2,149	2,056	2,062	2,061	2,075
$U_p[V]$	2,109	2,145	2,056	2,062	2,060	2,075

Obr.23 Porovnanie výstupného napätia fotodiód SLD-69IR1A a SLD-69CA1 pre biely papier, zelenú trávu a čiernu látku, $l = 10\text{cm}$

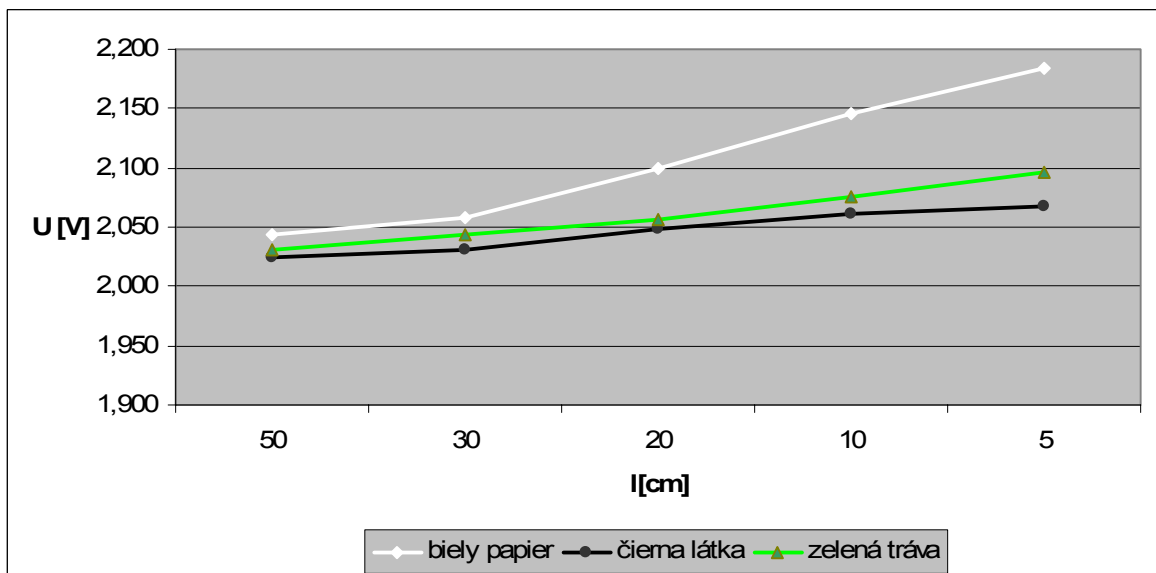
Tab.8 Namerané výstupné napätie $U[V]$, $l = 5\text{cm}$

Počet meraní	biely papier		čierna látka		zelená tráva	
	69IR1A	69C1A	69IR1A	69C1A	69IR1A	69C1A
1	2,178	2,182	2,063	2,067	2,071	2,097
2	2,177	2,183	2,062	2,065	2,072	2,098
3	2,182	2,182	2,060	2,070	2,071	2,099
4	2,165	2,184	2,060	2,068	2,069	2,100
5	2,166	2,183	2,062	2,069	2,070	2,099
6	2,167	2,186	2,061	2,070	2,069	2,096
7	2,174	2,185	2,062	2,068	2,070	2,095
8	2,173	2,186	2,062	2,069	2,071	2,094
9	2,172	2,187	2,061	2,069	2,071	2,095
10	2,173	2,189	2,062	2,068	2,070	2,095
$U_p[V]$	2,173	2,185	2,062	2,068	2,070	2,097

Obr.24 Porovnanie výstupného napätia fotodiód SLD-69IR1A a SLD-69C1A pre biely papier, zelenú trávu a čiernu látku, $l = 5\text{cm}$



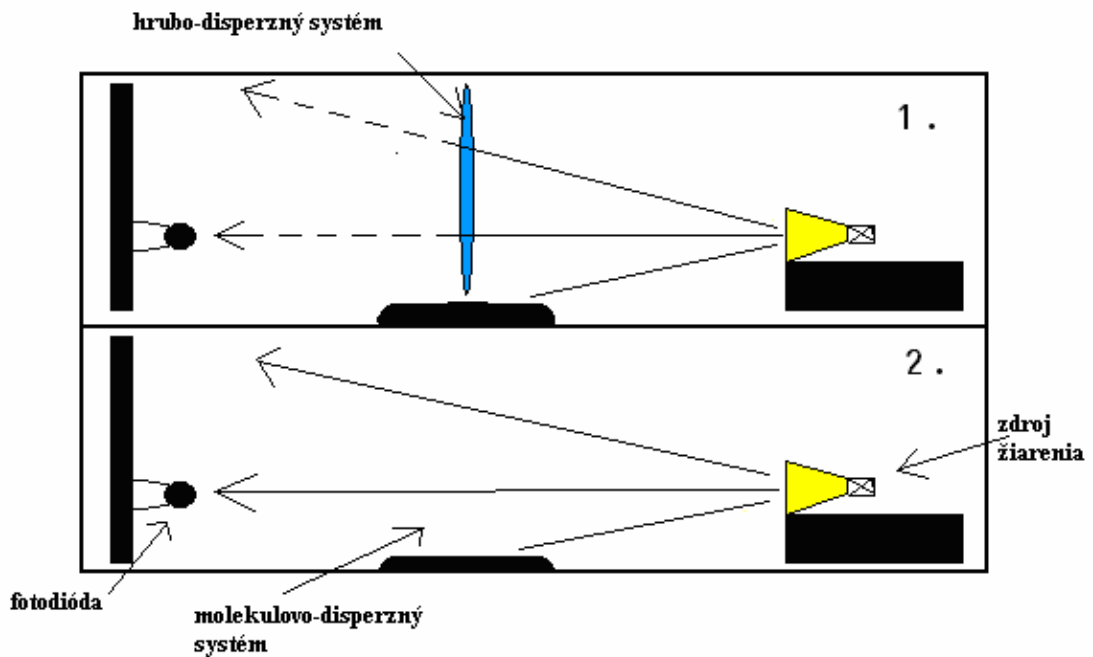
Obr.25 Závislosť výstupného napätia fotodiódy SLD-69IR1A od vzdialenosti volfrámovej žiarovky pre biely papier, čiernu látku a zelenú trávu



Obr.26 Závislosť výstupného napätia fotodiódy SLD-69C1A od vzdialenosti volfrámovej žiarovky pre biely papier, čiernu látku a zelenú trávu

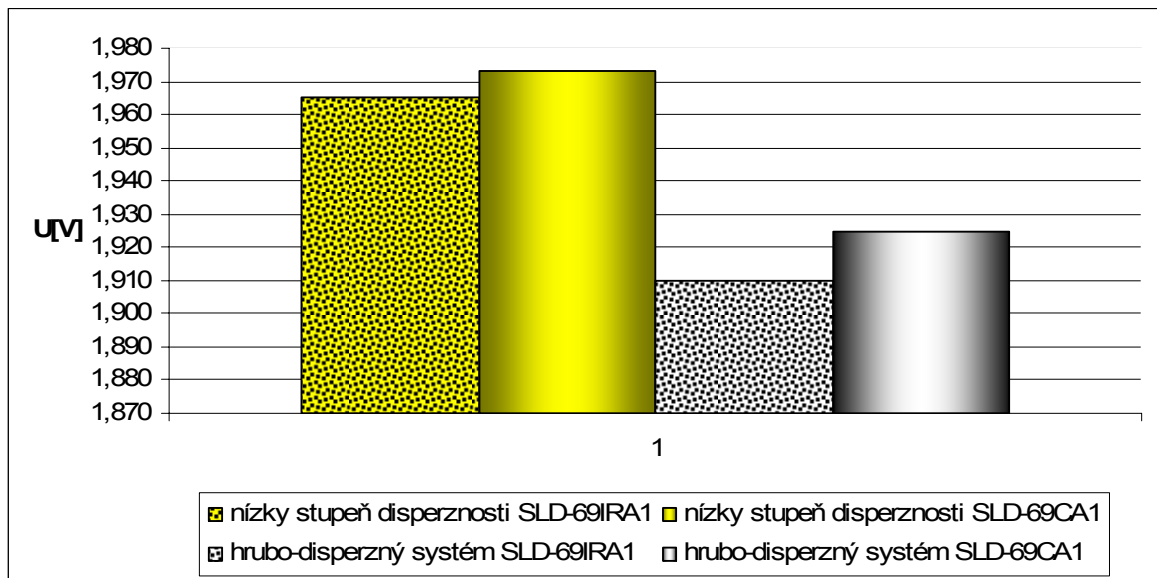
V mojom ďalšom meraní som nechal prejsť žiarenie volfrámovej žiarovky hrubo-disperzným systémom, čo v mojom prípade predstavovala vodná para a výsledky som porovnal s prechodom cez bežné prostredie, ktoré sa vyznačuje nižším stupňom disperznosti ako u hrubo-disperznom systéme(Obr.25).

Obr.27 Prechod žiarenia volfrámovej žiarovky hrubo-disperzným systémom a molekulovo-disperzným systémom



Tab.9 Namerané výstupné napätia $U[V]$ žiarenia pri prechode hrubo-disperzným systémom a molekulovo-disperzným systémom

Počet meraní	nízky stupeň disperznosti		hrubo-disperzný systém	
	69IRA	69C1A	69IRA	69C1A
1	1,965	1,973	1,910	1,925
2	1,965	1,974	1,911	1,924
3	1,964	1,972	1,911	1,924
4	1,966	1,971	1,910	1,926
5	1,964	1,974	1,910	1,925
6	1,965	1,975	1,909	1,924
7	1,966	1,973	1,908	1,926
8	1,965	1,972	1,910	1,925
9	1,965	1,974	1,911	1,924
10	1,966	1,972	1,910	1,925
$U_p[V]$	1,965	1,973	1,910	1,925



Obr.28 Porovnanie výstupného napätia fotodiód SLD-69IRA1 a SLD-69C1A pri prechode hrubo-disperzným systémom a molekulo-disperzným systémom

3 ZHRNUTIE ZÍSKANÝCH POZNATKOV

Po objednaní senzorov od firmy Silonex som skúsil ich vhodnosť k meraniu infračerveného žiarenia, ktoré bolo produkované prírodným a umelým zdrojom a to za rôznych podmienok a situácií.

Ako prírodný zdroj infračerveného žiarenia som použil Slnko. Ako bolo spomenuté, pri tomto meraní som použil tri rôzne podmienky, v ktorých pracovali fotodiódy SLD-69IR1A a SLD-69C1A. V prvom prípade boli fotodiódy vystavené priamemu slnečnému svetlu, pri druhom boli v tieni a pri treťom bolo zatiahnuto (Obr.16). Podľa predpokladu som fotodiódou SLD-69C1A nameral vyššie výstupné napätie vo všetkých troch podmienkach (obr.17), ako u fotodiódy SLD-69IR1A, pretože neobsahuje filter a dokáže prijímať energiu aj z viditeľnej oblasti. Prechodom zo zamračených podmienok k slnečným sa výstupné napätie zvýšilo, pretože šírenie žiarenia v atmosfére závisí na konkrétnych meteorologických podmienkach. Je teda rôzne za jasného počasia, daždi, hmle a keď je zamračené.

Pri umelom zdroji infračerveného žiarenia som použil volfrámovú žiarovku. Vyskúšal ako budú reagovať fotodiódy SLD-69C1A a SLD-69IR1A na optické vlastnosti svetla, teda odrazivosť, priepustnosť a pohltivosť. Použil som tri rôzne povrchy a to biely papier, čiernu látku a zelenú trávu. Povrchy sa od seba líšia farbou a geometrickou stavbou. Na tieto povrchy som nechal dopadať žiarivý tok z rôznych vzdialeností a to 50, 30, 20, 10 a 5 cm pod 45° k aktívnym zónam fotodiód, ktoré boli umiestené v tesnej blízkosti povrchu. Časť dopadajúceho toku sa od telesa odrazila, časť teleso pohltilo a časť telesom prešla. Pri bielom papieri som nameral najvyššiu výstupnú napäťovú hodnotu. To znamená že tento povrch sa vyznačuje najvyššou odrazivosťou. Na druhej strane sa najnižšou odrazivosťou špecifikovala čierna látka, čo dokazuje že černe sú charakteristické svojou veľkou pohltivosťou. Ako posledný povrch som skúsil zelenú trávu. Jej odrazivosť bola o trochu vyššia ako u čiernej látky, čiže sa vyznačuje pomerne veľkou pohltivosťou. Tieto merania zachytávali obe fotodiódy SLD-69C1A a SLD-69IR1A, pri čom o niečo vyššie výstupné napätie vykazovala fotodióda typu SLD-69C1A, pretože je citlivá aj na vlnové dĺžky viditeľného žiarenia, ktoré produkuje žiarovka s volfrámovým vláknom. Po každom zmenšení vzdialenosti sa výstupné napätie oboch fotodiód zväčšilo (obr.25,26). Takže bolo badateľné, že na intenzitu ožiarenia aktívnej oblasti fotodiódy má veľký vplyv jej vzdialenosť od zdroja.

Posledné meranie bolo zamerané na prechode žiarenia volfrámovej žiarovky hrubo-disperzným systémom, čo v mojom prípade predstavovala vodná para a výsledky som porovnal s prechodom cez bežné prostredie, ktoré sa vyznačuje nižším stupňom disperznosti ako u hrubo-disperznom systéme(Obr.28). Obe fotodiódy mi zaznamenali nižšie napätia pri prechode žiarenia hrubo-disperzným systémom, čo dokazuje ich vhodnosť k použitiu aj pri týchto typoch merania.

Nezanedbateľný vplyv na výšku výstupných napätí fotodiód má aj teplota okolia, preto som všetky merania robil pri izbovej teplote 25°C .

ZÁVER

V práci som čitateľov najskôr oboznámil s vlastnosťami infračerveného žiarenia. Zanalyzoval jeho prírodné a umelé zdroje a senzory, pomocou ktorých ho môžeme merať. Jednou z úlohou bolo nájsť vhodné typy infračervených senzor k meraniu infračerveného žiarenia. Kládol som dôraz na ich vysokú citlivosť a aby mali rozsah prijímaných vlnových dĺžok od 700 do 1400 *nm* .

Po prezretí internetových zdrojov sa ako najideálnejšie zdali senzory od firmy Silonex. Získal som od nich dva typy. Prvá fotodióda SLD-69IR1A s filtrom, ktorý prepúšťa infračervené žiarenie a jeho pracovné spektrum sa pohybuje v rozmedzí 400–1100*nm* . Druhá fotodióda SLD-69C1A, ktorá je bez filtru a je citlivá na vlnové dĺžky od 700–1100*nm* . Na oboch fotodiódach som meral veľkosť intenzity ožiarenia ich aktívnej oblasti prírodným a umelým zdrojom za rôznych podmienok a situácií. Po elektrickom zapojení senzoru som na napätový výstup priviedol na voltmeter, odkiaľ som zapisoval výsledné napätia.

Po vyhodnotení výsledkov a nadobudnutých poznatkov, sa dá povedať, že senzory SLD-69IR1A a SLD-69C1A vyhovujú meraniam pre blízke infračervené žiarenie. Pri tejto práci som sa stretol s teplotnou závislosťou fotodiód k ich výslednému napätiu, čo by sa mohlo stať predmetom ďalšieho riešenia a analýz tohto javu.

RESULT

In the Bachelor thesis, I have intimated readers with the characteristics of infrared radiation. I analyzed the natural and artificial sources of infrared radiation which we could measure with sensors. One task was to find suitable types of infrared sensors. Among the qualities, I emphasised high sensitivity and shorter wavelength in the range from 700 nm to 1400 nm.

After having studied many internet sources, I have chosen photosensors produced by Silonex. I received samples of two sensors types from them. The first photodiode SLD-69IR1A with passband filter for infrared radiation and with sensitivity in the narrow range about 990 nm. The second photodiode SLD-69C1A, which is without a filter and with its sensitivity in the range from 700 nm to 1100 nm. I measured response to irradiation of their active area with natural and artificial radiation sources under different conditions and situations. I was using a simple circuit with operational amplifier a tested photodiode. The output voltage was measured with multimeter in voltage measurement mode. I have noted results in the tables and expressed the relevant trends in corresponding graphics.

My experiments have confirmed that the sensor SLD-69IR1A is suitable for infrared radiation measurement. I have noticed the output voltage vaiation with temperature in course of my experiments what needs o be further analysed.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] Levitin, I.B.: Infračervená technika. Energia, Leningrad 1973
- [2] Vaško, A.: Infračervené záření a jeho užití. SNTL, Praha 1963
- [3] Daďo, S., Kreidl, M.: Senzory a měřicí obvody. ČVUT, Praha 1996
- [4] Daňek, D.: Kalibrační pracoviště pro infračervený dozimetr. Diplomová práce UTB ve Zlíně, FT ve Zlíně 2001
- [5] Neumann, P.: Měření expozičního množství tepelného záření. Disertační práce UTB ve Zlíně, FT ve Zlíně 2001
- [6] Hruška, F.: Senzory v systémech informatiky a automatizace. UTB ve Zlíně, FAI ve Zlíně 2007
- [7] Doleček, J.: Optoelektronika a optoelektrické prvky. UTB ve Zlíně, Praha 2007
- [8] <http://www1.silonex.com/>
- [9] <http://www.astronomiaonline.org/>
- [10] <http://www.national.com/ds/LM/LM741.pdf>

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

IR	[-]	Infračervené žiarenie
E	[J]	Energia fotónu
h	[W·s ²]	Planckova konštanta
f	[Hz]	Kmitočet žiarenia
c	[m·s ⁻¹]	Rýchlosť svetla vo vákuu
Q	[J]	Elektrický náboj
Φ_e	[J·s ⁻¹]	Žiarivý tok
J_e	[W·m ⁻²]	Intenzita žiarenia
H_e	[W·m ⁻²]	Intenzita vyžarovania
E_e	[W·m ⁻²]	Ožiarenie
I_e	[W·sterad ⁻¹]	Žiarivosť
L_e	[W·m ⁻² ·sterad ⁻¹]	Žiara
R	[-]	Pomerná odrazivosť
A	[-]	Pomerná absorpcia
T	[-]	Pomerná priepustnosť
R_λ	[-]	Pomerná spektrálna odrazivosť
A_λ	[-]	Pomerná spektrálna absorpcia
T_λ	[-]	Pomerná spektrálna priepustnosť
n	[-]	Index lomu
N	[-]	Počet častíc
λ	[nm]	Vlnová dĺžka
A_0	[-]	Sférické albedo
K	[V·W ⁻¹]	Integrálna citlivosť

K_λ	$[V \cdot W^{-1}]$	Spektrálna citlivosť
S_λ	$[-]$	Relatívna spektrálna citlivosť
NEP	$[W \cdot Hz^{-\frac{1}{2}}]$	Výkonný ekvivalent
D	$[W \cdot Hz^{-2}]$	Detektivita
α	$[-]$	Seebeckov koeficient, súčiniteľ prestupu tepla
σ	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$	Stefan-Boltzmannova konštanta,
T	$[K]$	Termodynamická teplota
I_{SC}	$[\mu A]$	Prúd nakrátko
V_{OC}	$[V]$	Svorkové napätie
I_D	$[nA]$	Prúd za tmy
C_J	$[pF]$	Svorková kapacitancia
t_r	$[\mu s]$	Doba nábehu senzoru
t_f	$[\mu s]$	Doba dobehu senzoru
V_{BR}	$[V]$	Obrátené prierazné napätie
λ_P	$[nm]$	Maximálna citlivosť na vlnovú dĺžku
λ_R	$[nm]$	Citlivostná vlnová dĺžka
TC_I	$[\% \cdot C^{-1}]$	Teplotný koeficient senzoru
θ	$[deg]$	Prijímací uhol
U	$[V]$	Výstupné napätie senzoru
U_P	$[V]$	Priemerná hodnota výstupného napätia
l	$[cm]$	Vzdialenosť zdroja od materiálu
T_A	$[^{\circ}C]$	Izbová teplota

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr.1	Spektrum elektromagnetického žiarenia	9
Obr.2	Termočlánková batéria	25
Obr.3	Závislosť $P_s = f(T)$ materiálu TGS.....	26
Obr.4	Pyroelektrický čip s predzosilňovačom.....	26
Obr. 5	Schéma konštrukcie fotogalvanometrického snímača.....	29
Obr.6	Schéma hradlovej fotónky	29
Obr. 7	Voltampérové charakteristiky germániovej fotodiódy	30
Obr.8	Keramická fotodióda od spoločnosti Silonex.....	33
Obr.9	Účinky filtrov fotodiód.....	34
Obr.10	Fotodióda typu SLD-69C1A	35
Obr.11	Citlivostná charakteristika fotodiódy SLD-69C1A	36
Obr.12	Fotodióda typu SLD-69IR1A	38
Obr.13	Citlivostná charakteristika fotodiódy SLD-69IR1A	39
Obr.14	Funkčná schéma elektrického zapojenia senzora	41
Obr.15	Usporiadanie operačného zosilňovača LM 741CN v púzdre	41
Obr.16	Fotodiódy SLD-69IR1A a SLD-69C1A za troch rôznych slnečných podmienok	43
Obr.17	Porovnanie výstupného napätia fotodiód SLD-69IR1A a SLD-69C1A za troch rôznych podmienok.....	44
Obr.18	Závislosť výstupného napätia fotodiód SLD-69IR1A a SLD-69C1A od rôznych podmienok	44
Obr.19	Meranie optických vlastností svetla pomocou fotodiód SLD-69IR1A a SLD-69C1A za použitia troch rôznych materiálov	45
Obr.20	Porovnanie výstupného napätia fotodiód SLD-69IR1A a SLD-69C1A pre biely papier, zelenú trávu a čiernu látku, $l = 50cm$	46
Obr.21	Porovnanie výstupného napätia fotodiód SLD-69IR1A a SLD-69C1A pre biely papier, zelenú trávu a čiernu látku, $l = 30cm$	47

Obr.22 Porovnanie výstupného napätia fotodiód SLD-69IR1A a SLD-69C1A pre biely papier, zelenú trávu a čiernu látku, $l = 20cm$	48
Obr.23 Porovnanie výstupného napätia fotodiód SLD-69IR1A a SLD-69C1A pre biely papier, zelenú trávu a čiernu látku, $l = 10cm$	49
Obr.24 Porovnanie výstupného napätia fotodiód SLD-69IR1A a SLD-69C1A pre biely papier, zelenú trávu a čiernu látku, $l = 5cm$	50
Obr.25 Závislosť výstupného napätia fotodiódy SLD-69IR1A od vzdialenosti volfrámovej žiarovky pre biely papier, čiernu látku a zelenú trávu.....	51
Obr.26 Závislosť výstupného napätia fotodiódy SLD-69C1A od vzdialenosti volfrámovej žiarovky pre biely papier, čiernu látku a zelenú trávu.....	51
Obr.27 Prechod žiarenia volfrámovej žiarovky hrubo-disperzným systémom a molekulo-disperzným systémom.....	52
Obr.28 Porovnanie výstupného napätia fotodiód SLD-69IR1A a SLD-69C1A pri prechode hrubo-disperzným systémom a molekulo-disperzným systémom.....	53

ZOZNAM TABULIEK

Tab.1 Elektrické parametre senzoru SLD-69C1A	37
Tab.2 Elektrické parametre senzoru SLD-69IR1A.....	40
Tab.3 Výstupné napätia $U[V]$ slnečného žiarenia za troch rôznych podmienok merané fotodiódami SLD-69IR1A a SLD-69C1A.....	43
Tab.4 Namerané výstupné napätie $U[V]$, $l = 50cm$	46
Tab.5 Namerané výstupné napätie $U[V]$, $l = 30cm$	47
Tab.6 Namerané výstupné napätie $U[V]$, $l = 20cm$	48
Tab.7 Namerané výstupné napätie $U[V]$, $l = 10cm$	49
Tab.8 Namerané výstupné napätie $U[V]$, $l = 5cm$	50
Tab.9 Namerané výstupné napätia $U[V]$ žiarenia pri prechode hrubo-disperzným systémom a molekulo-disperzným systémom	52